



TITLE:

貯水池の水質変化に関する基礎的研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

海老瀬, 潜一

CITATION:

海老瀬, 潜一. 貯水池の水質変化に関する基礎的研究. 京都大学, 1976, 工学博士

ISSUE DATE:

1976-11-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r3203>

RIGHT:

貯水池の水質変化に関する基礎的研究

1976年 6月

海 老 瀬 潜 一

貯水池の水質変化に関する基礎的研究

1976年 6月

海 老 瀬 潜 一

目 次

第1章 結 論	1
第1節 貯水池研究の動向	1
第2節 本研究の目的	2
第2章 貯水池の流動と水質の関係	4
第1節 概 説	4
第2節 フロー・パターン	6
第3節 貯水池の水質特性	10
第4節 水温分布・流速分布・水質分布	17
第5節 結 語	18
第3章 貯水池観測による水質変化の研究	20
第1節 概 説	20
第2節 水質調査	20
2-1 水質調査	20
2-2 流動調査	66
第3節 水質分布と季節変化	70
第4節 水質の経年変化と富栄養化	92
第5節 結 語	118
第4章 模型実験による流動および水質変化の研究	122
第1節 概 説	122
第2節 実験装置	122
第3節 実験方法	124
第4節 実験結果および考察	126
第5節 相似則	139
第6節 結 語	143
第5章 貯水池の水質変化と富栄養化の解析的研究	145
第1節 概 説	145
第2節 水 温	146

第3節 浮遊性物質	163
第4節 溶解性物質	170
4-1 溶解性物質	172
4-2 溶存ガス	176
第5節 富栄養化傾向と生態系	181
5-1 富栄養化傾向の時系列解析	183
5-2 水質と生態系との相関	196
第6節 結 語	216
 第6章 貯水池水質管理の基礎的考察	220
第1節 概 説	220
第2節 従来からの問題	220
2-1 水温問題	220
2-2 濁水問題	221
2-3 溶存酸素の問題	224
第3節 富栄養化問題	226
第4節 揚水発電用貯水池の問題	229
第5節 今後の水質管理	232
第6節 結 語	235
 第7章 結 論	238
第1節 研究成果の総括	238
第2節 今後の課題	239
 記 号 表	241
付 録 I 水質変化の時系列解析について	243
II 栄養塩および有機汚濁物量の収支について	245
謝 辞	250

第1章 緒 論

第1節 貯水池研究の動向

大気と海洋および陸地における水の大循環の中で、陸上において降水の一時的な流出を防ぎ、その一部をいったん貯留し、長期にわたってその利用をはかる貯水池の歴史は古い。

貯水池は生活用水やかんがい用水などを確保するためのものであり、記録に残る最古の人工的なダムとしては紀元前 4,000 年の古代エジプトの石造ダムがある¹⁾。その後、16 世紀末のスペインに初めて 2 つの石工の近代ダム (Almanza と Alicante) がかんがい用として誕生することになる。そして最近のような概観を呈するダムとしては、1866 年にフランスの Furens ダムが初めての重力ダムとして登場するに至っている。また、日本においては千数百年前の西日本のかんがい用としての堰やアースダムから、1900 年の神戸市の布引ダムへと変遷し、近代ダムの先駆としては発電用の志津川ダムが 1924 年に宇治川に建設されている。その後、発電用ダムが続々誕生し、1940 年代から時代の要請によって多目的ダムが増加し、現在に至っている。すなわち、洪水調節、発電およびかんがいのための用水だけでなく、上水や工業用水の供給も受けもち、その重要性はますます増大している。

この貯水池は、水資源の確保と河川水の高度利用という観点で豊水期および洪水時の水を貯留し、渇水期に放流するという利水の目的は、洪水の調節機能とは相反する要求であるが、どちらも流況の人為的な調節であり、その時点での最適な操作がとられ、その有用性を高めている。

貯水池の役割は、その時代の要請によって増えて変化してきたように、その水利用の形態も時代とともに変遷し、水質に関する要求も変化してきている。すなわち、明治末期までは産業の主力が米作中心の農業であり、生活用水とかんがい用水が中心であった。その後の産業革命によりエネルギー源としての発電用水が重視され、近年の産業の発展と人口の都市集中に伴ない、都市用水および工業用水の需要増加が顕著になってきた。したがって、貯水池には水量的な要求の他に水質面の要求も多様化してきている。生活用水としては伝染病（疫病）など病原菌の汚染のない清浄な水、かんがい用水としては稲の生育にとって有利なあたたかい水、工業用水としては汚濁されない安定な水質という要求である。さらに、最近では景観やレクリエーション的な要素を加えた環境としての役割も要求されている。

この多くの役割を有する貯水池に関する研究は、最近 80 年ほどの間にそれぞれの分野から必要に応じて行われてきており、進んだ部分がある反面、遅れている部分も多く、総合的な研究は少ない。洪水調節や堆砂など水理学的な面からは土木工学、かんがい用水としての水温問題については農業工学、生物を含む陸水としての性質については陸水学や湖沼学、上水および工業用水の原水としての水質面からは衛生工学というように各分野から研究されている。そして、最近では環境の面の重要性から、生態学的な考察も含めた総合的な研究の必要性が高まり、衛生工学の果たす役割が重大となってきている。一般に、貯水池は、河川や湖沼とは異なる性質を有するが、似た性質も有している。貯水池、なかでもダム貯水池は自然状態に加えて人為的な操作によってその流況が変化する点が特徴である。すなわち、天然湖沼は夏季に熱

成層し、風による流動のほかは流動性に乏しい。河川は流動性に富み、水深も浅いため乱れや混合も大きい。これに対して貯水池、とくにダム貯水池の大部分は湖沼のように夏季に温度成層し、冬季に循環する性質を有するが、一年を通して河川のように流入流出に伴う流動がある。この流入流出に伴う流動と成層化が貯水池の流動と水質の分布の変化特性を複雑化している。貯水池の流動と水質分布の間には密接な関係があり、貯水池の流動は水質変化の基因となる。また、ある水系内に貯水池が築造されると、貯水池部分はもとよりその下流にも流況や水質、したがって河床形態や水生生物を含めた環境に種々の影響もたらされる。それゆえ、貯水池内の流動や水質分布を知ることは、貯留水の利用のためのみにとどまらず、さらに貯水池を含めたその水系における水質管理に役立つこととなる。

また近年、渇水のたびに貯水池開発の重要性が再認識され、河水の流域変更の提案も出て「水の復権」が強調され、最近の石油危機の時期にはクリーン・エネルギーとしての水力発電が見直されて、貯水池への関心も高まっている。

第2節 本研究の目的

日本において、貯水池の水質変化に関する研究は、研究対象が広範囲におよぶために、個々の現象に対して個々の分野からのアプローチを試みたものが多い。総合的な研究は吉村信吉博士²⁾の湖沼学に関するものが見られるのみであり、個々の現象に対する研究は、貯水池の流動と濁質については合田健博士³⁾、水温変化に関しては新井正博士⁴⁾、プランクトンについては小島貞男博士⁵⁾の先駆的な研究業績がある他は、観測報告を中心とするものがほとんどである。

外国においては、アメリカのコロラド河のMead湖における研究⁶⁾、テネシー河のダム群についてのT.V. A.の研究⁷⁾が著名である。

本研究では、貯水池における一般的な水質変化に加えて、近年問題となっている水質汚濁現象および最近顕在化しつつある富栄養化現象に注目して、統一した解析アプローチで水質変化の機構を明らかにしようとするものである。すなわち、貯水池の水質変化の一般的な特性を把握し、水質変化モデルによる理論解析を行ない、総合的な貯水池の水質管理の基礎を固めんとするものである。まず、貯水池の流下方向および水深方向の水質分布の変化パターンを統計的解析法である調和分析を含む時系列解析によって、定常的な季節変化（周年変化）と長期傾向を示す経年変化に分けて定量的な把握を行なう。貯水池の水質変化特性で最も重要な水温成層状態における水質の挙動について、模型実験による検討を加える。さらに、流動状態を考慮した水質変化の解析モデルを構成し、物質およびエネルギー収支に基いて水質変化の移動現象論的な解析を行なう。とくに植物プランクトンについては富栄養化現象との関連を重視して、生態学的なシミュレーションを試みる。そして、上記の研究成果の応用として、貯水池の種々の問題ごとに、水質管理の提言を行なう。

したがって、本研究の特色は、貯水池における各種の水質因子の特性を考慮しつつ、水質全般に対する時系列解析による水質変化の全体的な把握をしたことと、さらに移動現象論的取り扱いにより水質変化機構を詳細に解析したことである。また、貯水池の実際の観測調査、模型貯水池による模型実験、解析モデルによる理論解析と総合的な水質変化の考察も特色であり、植物プランクトンを例とした生態学的シミュレーション

ションの貯水池への適用も新しい試みである。

したがって、以下の章の内容はつぎのようである。

第2章では、貯水池の流動と水質分布の特性について詳述した。流動と水質変化の関係は密接であり、水質の中でもとくに水温分布の周年変化は、フロー・パターンや他の水質分布変化に支配的であることを述べている。水質変化の特性から、各種水質因子のグループ分けを行なって、個々のグループの変化特性も論じている。

第3章では、千叡貯水池における水質および流動の観測調査に基いて分析・検討を行なっている。貯留水の水質変化を統計的な時系列解析によって、経年変化と周年変化とに分けた形で表現している。また、高水後の濁水滞留現象に注目して、流入水の滞留時間の検討も試みている。

第4章では、一般的な知識や実際観測では不明確な現象を明らかにするために、条件の制御可能な模型貯水池製作によって、成層状態下の温度躍層に注目して水温、浮遊性物質、溶解性物質の移動現象を実験的に検討した。実験結果は第5章の理論解析に供されるものとなる。

第5章では、第2章、第3章、第4章の貯水池水質変化の一般特性、千叡貯水池での観測調査結果、模型実験結果の考察をもとに、貯水池水質変化機構のモデル化とその解析を行なっている。水温や水質変化の微分方程式による理論解析を主とし、実測資料に基く調和分析によって変化の記述を行なった。また富栄養化という現象に注目して、貯水池流入水の濃度変化、負荷量変化を時系列解析で扱ったほか、貯水池内での植物プランクトンの変化を生態学的なシミュレーションモデルによって解析を行なっている。

参 考 文 献

- 1) 土木学会編：「土木工学ハンドブック」第31編 ダム pp.2169～2173 技報堂(1964)
- 2) 吉村信吉：「湖沼学」 pp. 1～387 三省堂(1937)
- 3) 合田 健：「上水浄化における水理学上の諸問題」 京都大学 学位論文(1956)
- 4) T., Arai：“Heat Budget Studies on the Water Temperature of the Artificial Reservoirs, Part. 1, Part 2” 資源科学所彙報 No.68, No.69. (1967)
- 5) 小島貞男：「浄化作業を対象とした貯水池のPlankton Controlに関する研究(I), (II), (III)」 水道協会雑誌第356号(pp. 2～22), 第357号(pp. 21～44), 第358号(pp. 15～44) (1964)
- 6) C. H. Howard：“Density Currents in Lake Mead” Proc. 5th Congress of I.A.H.R. pp.355～362 (1953)
- 7) A. S. Fry, M. A. Churchill & R. A. Elder：“Significant Effects of Density Currents in TVA’s Integrated Reservoir and River System” Proc. 5th Congress of I.A.H.R. pp.335～354 (1953)

第2章 貯水池の流動と水質の関係

第1節 概 説

貯水池の流動や水質変化の現象は、貯水池自体の位置、形状、地質、流域的要素など固有の性質や、水文および気象条件を含めた環境要素などの影響を受ける。貯水池の水理特性および水質特性は、河川や天然湖沼と比較すれば、貯水池の流下方向および水深方向の変化に特色がある。その特色を支配する具体的な性質を以下に列挙してみる。^{1), 2), 3), 4)}

(1) 貯水池の位置と湖盆形態

貯水池の地理的位置に基く気候学的な性質、すなわち、熱帯、亜熱帯、温帯、亜寒帯、寒帯の別、および緯度によって定まる太陽エネルギーの到達量は、貯水池の熱収支を支配し、貯水池内の生物生態系への影響も大きい。また、貯水池の形状や規模、地質や水文量といった流域特性、貯水池の用途および構造などが貯水池の流動や水質変化の特色となる。

(2) 流入・流出の水量および深度

貯水池への流入水の流量および密度は、貯水池流入端での流入深度や混合度を支配する重要な因子であり、貯水池の水質変化の入力条件を与えるものである。また、貯水池からの取水および放流による流出水の流量およびその流出深度は、流出に伴う流動を通して水温や他の水質の分布に影響を及ぼす。

(3) 熱収支と水温変化

貯水池の熱収支は貯水池の水温変化を決定するものであり、水温変化はその時間的、かつ、流下および水深方向の変化を通して他の水質変化に支配的な影響を及ぼすものである。

(4) 停滞・循環とフロー・パターン

貯水池の水深が約15 m以上ある部分については、夏季に温度成層現象を有することが多く、水温成層の形成から消滅に至る水温の鉛直分布の周年変化、すなわち、貯留水の停滞・循環現象を伴う。貯水池の停滞・循環現象は、貯水池の流動状態の周年変化を左右し、各季節に典型的なフロー・パターンを出現させる。このフロー・パターンは貯留水の混合状態および実質滞留時間を支配するので、フロー・パターンと水質変化の対応関係は重要である。

(5) 水質分布と栄養型

貯水池は、貯留の目的のために一般に水深が大きく、流入から流出までの水平方向の水質分布と水深方向の水質分布の両者の変化に特色がある。貯水池における水質分布は、滞留時間の影響が大きく、滞留期間中の生物的作用の影響も重要となる。貯水池内での生物的水質変化は、食物連鎖の基礎生産を支える植物プランクトンの1次生産によっても左右される。栄養塩濃度は植物プランクトンの増殖・生産過程に関係する。栄養塩の種類と濃度は1次生産のポテンシャル量として重要であり、貯水池の栄養状態を示す栄養型分類を決定するものである。

(6) 生物相と生産性

貯水池における生物は、食物連鎖の基礎をなす生産者の植物プランクトン、植物プランクトンを餌とする動物プランクトン、さらに魚類などの消費者、そして、分解者としての細菌が重要である。このうち、種々の環境条件下での植物プランクトンの種類と濃度は、貯水池の生産性を支配するものとして、とくに重要なものであり、富栄養化現象との関連からも注目されるものである。

これらの項目の中で、(3)項以下は、後の各節において、関連項目をまとめて詳述し、ここでは貯水池特性と(1)、(2)項についてふれることにする。また、貯水池の位置については、温帯および亜熱帯に属するものに取り扱いを限定する。したがって、取り扱う貯水池の緯度もおおのずと定まってしまうことになる。貯水池の高度については、日本ではその立地条件から山間部に存在するものが多く、かなりの高地の場合もあるが、そのために取り扱いに特別な配慮を必要とするものは本研究の対象外とする。

(I) 貯水池形状

ダム貯水池には、河道をそのまま利用して堰止めたり、河道付近の適地に導水して貯留する方式などがある。ダム貯水池は、堰などに比べて水深が大きく、流入量および取・放水量の変動に伴う水位の変化や温度躍層の存在などにより、一年を通じて同じ流動ではない。また流入して取水あるいは放流されるまでの滞留時間は、成層現象なども加わって複雑に変化する。貯水池内水質については、流入水質の変化はもとより、貯水池内での沈澱、再溶出、躍層形成などのために水質変化を生じる。したがって放流水の水質は多様となる。また貯水池は、水深の小さい流入端（上流端あるいは背水先端）付近の緩流河川のような部分から、水深の大きい堰堤（下流端あるいは流出端）付近の湖のような部分にまで変化する。流入端や、放流口あるいは取水口付近における流動および水質分布は水利用の際に重要な意味をもってくる。

一般に、ダムはその水深と容量、流入量と流出量、滞留時間の水理特性および水質変化特性から、河川型（あるいは調整池型）の“流れダム湖”と湖沼型の“とまりダム湖”に分けられる。このような分類は、地球科学的な立場の湖沼学で行なわれる緯度と高度（位置）、気候帯、容量、水表面積、深度といった地域、地形、形状、地質などの要素を中心とした分類と比較してややあいまいであるが、実質的な分類であり、貯水池の概要を全体的に把えた表現と考えられる。

(II) 流入・流出特性

貯水池の流入特性は、その流域特性にも影響されるが、一般に、梅雨期、台風の時期、融雪期などの豊水期の水量を中心にその一部を貯留し、渇水期における水利用に供するようになっている。したがって流入特性は、降水量や流域面積などに支配されるが、どの時期の水を貯留するかによって、後述する濁水や水温の水質的な問題と関連する。また、渇水時の流入水は汚濁物質濃度が高くなり、貯水池の水質汚濁現象を伴うことが多い。

そして流入水の貯水池流入端における流入深度は、流入水の密度と貯留水の密度分布の相対的な関係から定まり、温度成層期には流入水は貯水池の等密度層を密度流となって流入することが多い。これは海域における潮目の現象のように、流入端での流入水の潜行のために水表面にゴミなど浮遊物質が集積する停滞帯（demarcation line）という境界線として確認できる^{3,6)}

流出特性は、高水期の治水のための放流の他は水利用形態によって左右される。すなわち、かんがい

用としては、春から夏までの季節利用、発電用としては、電力需要に基いた時間利用、そして、上水や工業用水のほぼ一定量の取水パターンがあり、全体としては、季節的に変化する。その取水あるいは放流深度は貯水池の構造上からの制約によって固定されることが多く、量的には水位変動の影響を直接受けないが、水質の鉛直分布の影響は直接受けることになる。このため、水利用の上では、取水あるいは放流水の水質は、その鉛直分布に伴う流出特性に大きく影響されることになる。

第2節 フロー・パターン

貯水池の流動状態を1年のサイクルとして見た場合、いくつかの流動形態に分けることができる。一般に水深が15 m以上ある貯水池では、その流動は主として貯留水の密度分布、したがって、水温分布に支配される。すなわち、温帯および亜熱帯に属する貯水池では、熱収支の季節変化に伴って、停滞と循環を繰り返すのが一般的であるが、貯水池および流域の特性によっては、このパターンからはみ出す場合もありうる。貯水池の流動においては、水温分布にも影響を及ぼす因子である取水あるいは放流の位置およびその流量、流入水の流入深度およびその流量が大きな影響力をもつことになる。このように貯水池の流動が種々の条件によって支配されるので、その流速分布の推定は甚だ困難である。しかし、その流動状態は水温分布だけでなく物理的および化学的な水質因子の分布、さらに生物分布によってもある程度まで把握することができる。すなわち、流入水・貯留水・流出水の水質について、濁度やSS、電気伝導度、あるいはプランクトンの相と濃度の分布状態から流動パターンを推定することができる。例えば、大きな滞留時間の貯水池では流入水は河川水系のプランクトンを多量に含み、貯留水は湖沼水系のプランクトンを多量に含む傾向があるため、それぞれの量と位置から両者の流下方向への変化によって主流の状態の推定も可能となる。⁷⁾

貯水池には、緩流河川のような水深の小さな流入端付近から湖沼のような中・下流部があり、貯水池内での流速は一般にあまり大きくはないが、それが測定されている例も少く、それも比較的流速の大きい流入端や出口付近に限られることが多い。その数少ない測定例として、合田による千苧貯水池⁸⁾、新井他による田子倉⁹⁾および美和貯水池¹⁰⁾などの例がある。また、水温と濁度や電気伝導度によるフロー・パターンの推定例として、AndersonによるMead湖(Fooverダム)の四季のパターン¹¹⁾、ChurchillらによるT. V. A.の連続するダム群における密度流を中心としたフロー・パターン¹²⁾の実測例がある。

そこで、太陽エネルギーの受熱および大気への放熱の変化を中心とした熱収支の結果としての水温変化に基くフロー・パターンの典型的な分類をその観測例をまじえて示すことにする。この分類は湖沼学的なアプローチを人工貯水池にも適用したものである²⁾。完全な停滞期と循環期の間の遷移期(移行期)の把握に研究者の微妙な差異はあるが、大筋では一致する分類である。表2-1にはその6つに分けられた分類と、それに対応する人工貯水池の水温鉛直分布の季節変化を図2-1、図2-2に示してある。

人工貯水池の場合は、湖沼とは異なって流入・流出量が多く、したがって水位変動が激しく、夏季に取水の影響などで温度躍層が上下2つ出現することが多いのが特色である。温度躍層は、水温の鉛直分布における急変部のことであり、この上下で水質的に相当な変化を生ずるので変水層とも言われ、その上部の層を表水層、下部の層を深水層と称する。この温度躍層は一般に2℃/m程度の水温傾度(勾配)を有し

表 2-1

時 期 区 分	熱交換
(1) 夏季停滞期	受 熱
(2) 夏季部分循環期	
(3) 秋季全循環期	放 熱
(4) 冬季停滞期	
(5) 冬季部分循環期	受 熱
(6) 春季部分循環期	

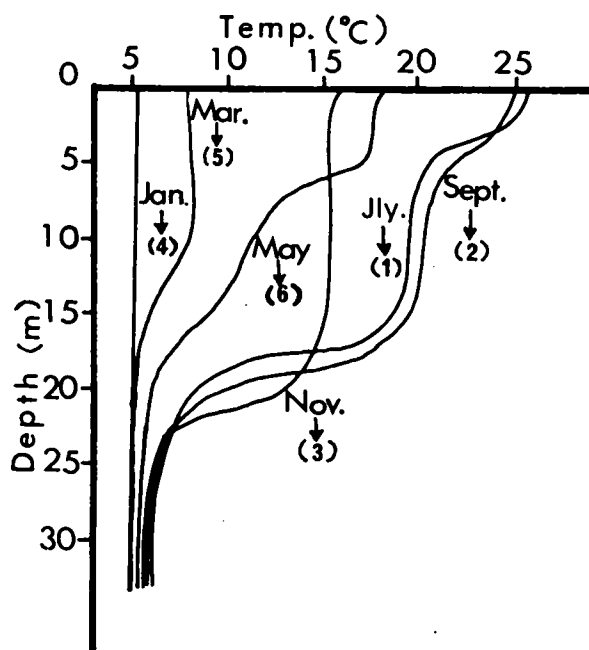


図 2-1 水温鉛直分布 (千苅貯水池; 取水塔前地点, 1974年)

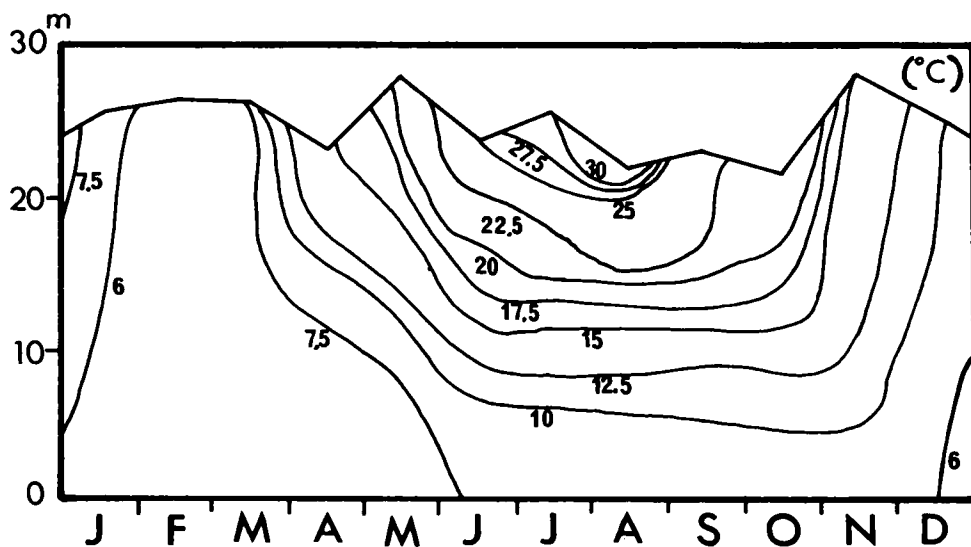


図 2-2 水温の周年変化 (千苅貯水池; 膳棚地点, 1973年)

ており、 $5^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 程度の大きさもよく見られる。この水温勾配は水体の鉛直安定度を支配するので、躍層強度を表わすものとして用いられることがある。

鉛直安定度は、水体の停滞・循環の目安となり、水体の混合の可能性を示す密度流に関する Richardson

数 (Ri) と混合の度合を示す拡散係数とともに、流動状態の指標となるものである。

鉛直安定度は、水の密度を ρ 、水温を θ 、浮遊性物質濃度を c 、溶解性物質濃度を s 、圧力を p 、鉛直座標を z とすると次式で表わせる。⁶⁾

$$E = \frac{d\rho}{dz} = \frac{\partial\rho}{\partial\theta} \cdot \frac{d\theta}{dz} + \frac{\partial\rho}{\partial c} \cdot \frac{dc}{dz} + \frac{\partial\rho}{\partial s} \cdot \frac{ds}{dz} + \frac{\partial\rho}{\partial p} \cdot \frac{dp}{dz}$$

ここで、最後の圧力差に基づく $\frac{\partial\rho}{\partial p} \cdot \frac{dp}{dz}$ 項は $5 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^3 / 10 \text{ m}$ 程度であり、溶解性物質濃度はその変化の密度への寄与度も例えば $10 \text{ ppm} / 1 \text{ m}$ で $10^{-5} \text{ g/cm}^3 / \text{m}$ と小さいので無視できる。また、貯水池の濁水流入による密度変化は濁度 150 度の浮遊性物質濃度がほぼ 150 mg/l で、水温の 15°C 付近における 1°C の水温差に相当する程度であり、かなりの高濁度になって初めて密度分布に影響が出ることになる。Richardson 数は、水平流速を u とすると、

$$Ri = \frac{g}{\rho} \cdot \frac{d\rho/dz}{(du/dz)^2} = \frac{g}{\rho} \cdot \frac{E}{(du/dz)^2}$$

乱流状態下における乱れの大きさの指標となる乱流拡散係数 E_i は、平均流速 \bar{u} と拡散物質平均濃度 \bar{c} 、およびそれぞれの変動値の u' と c' によって $E_i = -\overline{u'c'} / \left(\frac{\partial c}{\partial x_i} \right)$ 、と表わされる。このように鉛直安定度 E 、Richardson 数 Ri 、および拡散係数 E_i は、主として水温分布に従属する密度分布、および流速分布などによって支配されるので、貯水池の成層状態や混合状態の程度を示す指標となり、フロー・パターンの推定にも重要であるほか、植物プランクトンと栄養塩の接触頻度なども支配する。

つぎに、実際の貯水池におけるフロー・パターンの例を、流速分布の観測例をまじえて示すことにする。まず、堀内・安部¹³⁾による美和貯水池の流入端付近における流速分布を図2-3に示す。この場合の流入水は底面近くを底面勾配に沿って流入する密度流の状態を示している。さらに新井⁹⁾による田子倉貯水池上流部分における流速分布を示したのが図2-4である。これらの図には水温分布も示されており、流速分布との対応もよくわかり、夏季には表水層の逆流部分が確認されている。これらはプロベラ式微流速計（新井、試作による）による流速分布である。また、合田⁸⁾の千苺貯水池における流速分布の観測例は水のうを用いた一種の湖流板によるものであり、その結果は図2-5に示すように、貯水池中流部の数少ない測定例である。

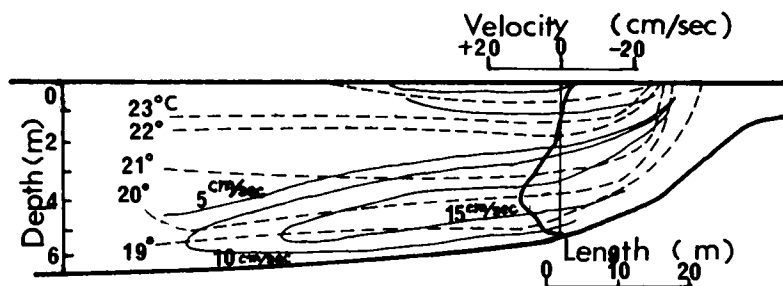


図2-3 美和貯水池流入端付近の水温・流速分布（堀内・安部¹³⁾）

これらの流速分布に、水温および水質分布からの推定も加えてつくられたフロー・パターンの例を新井³⁾による田子倉貯水池、合田⁸⁾による千苺貯水池について、それぞれ図2-6、図2-7に示す。さらに、大規模貯水池の例としてはAnderson¹¹⁾らによるMead湖のフロー・パターンを図2-8に示す。季節変化に伴う停滞・循環期のフロー・パターンが大すじにおいて類似している。

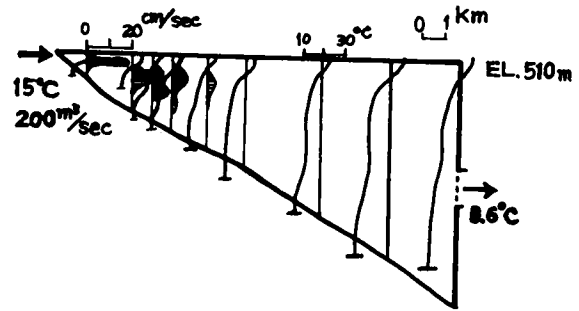


図2-4 田子倉貯水池の水温・流速分布(新井⁹⁾)

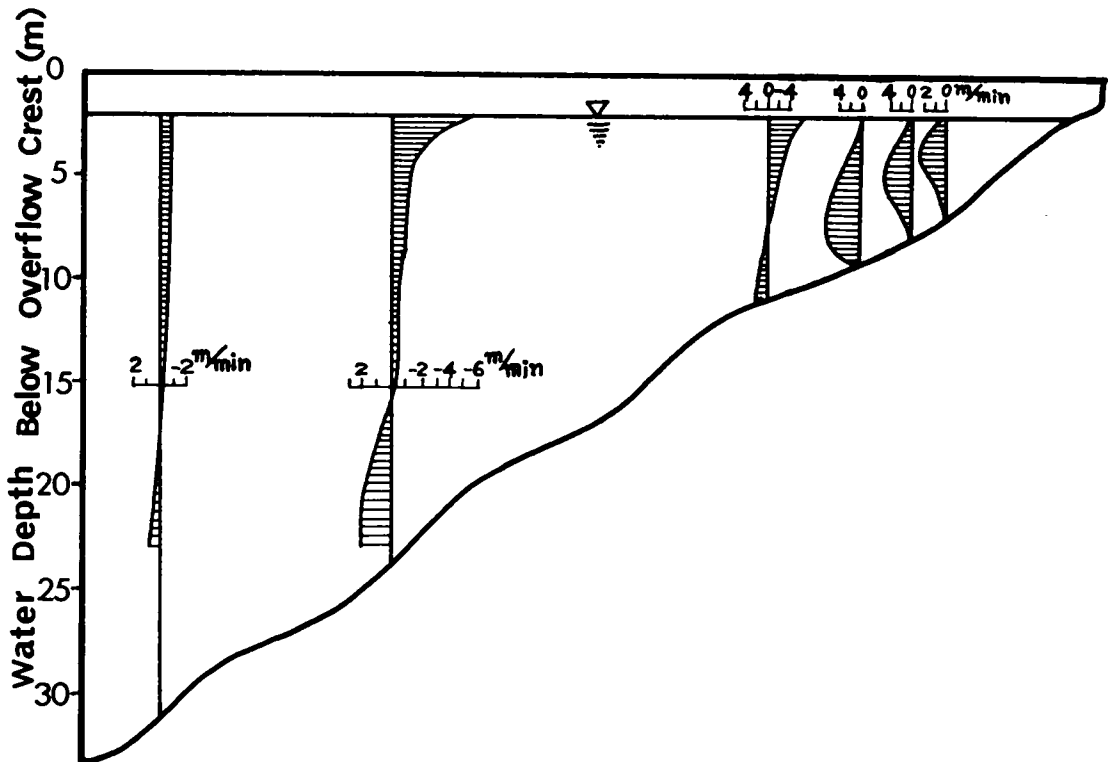


図2-5 千苺貯水池流速分布(合田⁸⁾: 1953年12月)

また、後述の第6章第2節とも関連するがT. V. A. の連続するダム群による低水放流によるフロー・パターンの特殊例¹²⁾を図2-9に示す。これは水温による密度流の極端な例である。河川上流側ダムの低水温の中層以深の放流水を受ける下流側ダム貯水池では、流入水が底付近に沿って流入する密度流となり、さらに下流側ダムに深水層から放流されて、温かい上層水との混合や受熱も少くなる。これらから、冬季においては、一様な密度分布のため流入水は流入端付近で貯留水に対してその慣性あるいは流勢に基く流動を示し、中流部では主流の厚さは大きく、不明瞭となり、流出端近くでは流出に伴う流動が顕著となるが、全体としては、主流の広がりが大きく明確ではない。また、夏季成層期においては、主流として、

限定された厚さで、顕著な温度密度流が見られ、この流れを中心にして、水表面や底面近くの逆行流が生じることになる。そして、春および秋は、上記の冬および夏の流動状態への遷移期あるいは移行期として、徐々に両者の安定した流動状態へ向かう過程としての様相を見せる。

第3節 貯水池の水質特性

貯水池内の水質特性を左右するものは、流入水の流入特性（水量・深度および水質）と貯水池内での水温変化であり、両者とも季節的に変化し、それに伴って水質も物理的、化学的、生物的に変化や遷移を繰り返す。そして、1年をサイクルとする季節変化だけでなく、貯水池の環境変化や流入水の特性の変化に加えて蓄積や溶出により経年的に変化する部分もあり、これは富栄養化傾向とも密接に関連する。

水質の1年サイクルの周年変化は、大別して貯水池の秋季から冬季の循環期、夏季の成層期、およびそれぞれへの移行（遷移）期に従って変化する。各種水質因子はその変化のパターンに特色があるので、その特色によっ

ていくつかのグループにまとめることができる。^{2, 14, 15, 16)}すなわち、そのグループは浮遊性物質、溶解性物質、溶存気体、生物相とその濃度、pH、その他である。浮遊性物質のグループは浮遊性物質(SS)、濁度、などであり、沈降作用を伴うので他のグループとは区別される。なお、特別なものとしてプランクトンおよびその死骸濃度もこれに含まれる。溶解性物質のグループには、電気伝導度や Cl^- など各種のイオン性物質がこれに属し、酸化還元反応など化学反応との関係が強く、溶存酸素やpHの分布の影響により形態変化も伴う。また溶存気体は、溶存酸素や炭酸ガスが主であり、 H_2S や CH_4 も含まれ、生物の呼吸や光合成の他に酸化還元反応との関係が強い。生物相とその濃度は、光量、水温、栄養塩濃度と関係があり、生物相は食物連鎖を通して相互に関連する。pHは、炭酸塩濃度やアルカリ度によって影響を受けるため、生物の光合成量との関係が強い。その他としては、総合的な汚濁指標のごとき水質項目で、 KMnO_4 消費量、BOD、COD、TOCなどが含まれる。

これらの水質因子の幅方向の分布は、貯水池が大きな湾形部を有したり、いくつかの枝状に分岐している場合を除けば、一様であると考えられる。また、ある水質成分の濃度に特徴がある流入水が一時的に大量に流入したような場合（いわゆる、一種のトレーサー物質を投入したような場合に相当する）以外は、あまり流下方向の分布に差がないことも特色の1つである。しかしこれらは、風によって影響を受けることも多く、卓越した風の影響も考慮に入れておく必要がある。そして、最も重要なものが水質の鉛直分布であり、水質変化の解析における境界条件となる水表面と底面付近は、境界面を通しての物質、エネルギー、

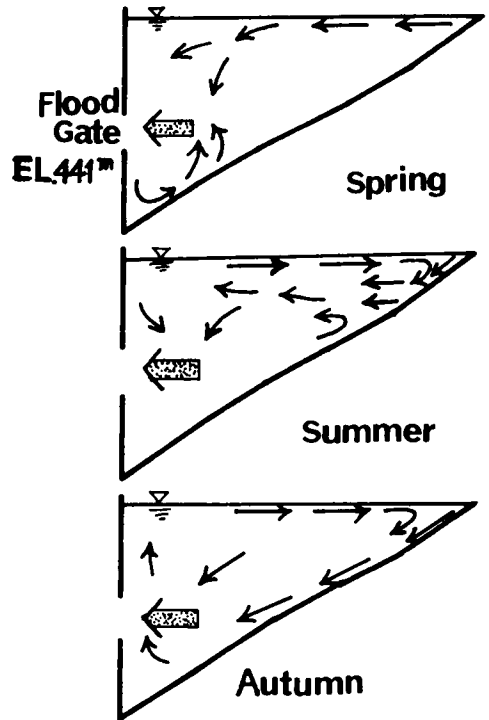


図2-6 田子倉貯水池のフロー・パターン（新井³⁾）

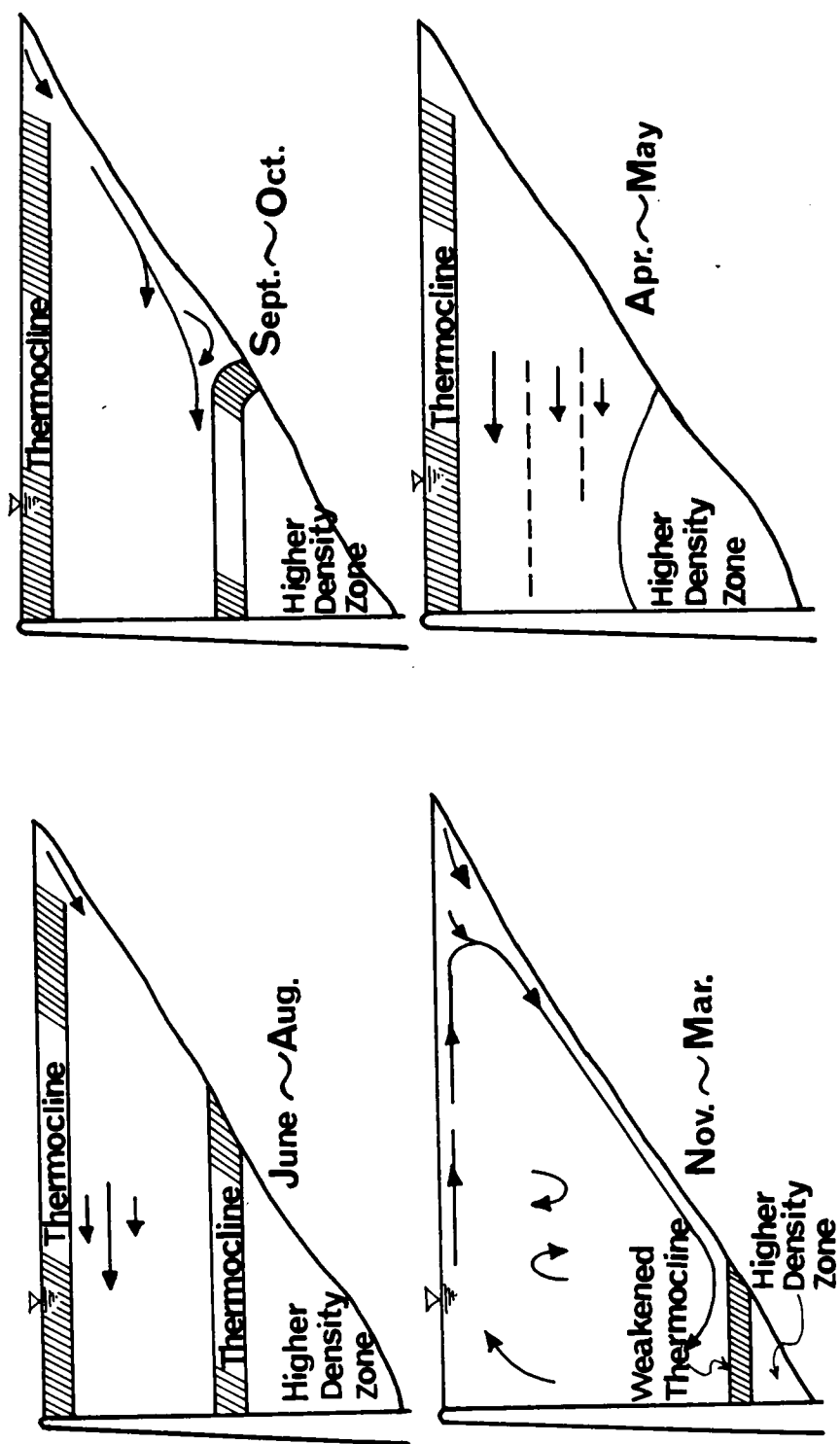


図 2-7 千苅貯水池フロア・パターン (合田⁸⁾)

運動量の移動の有無とその大きさが問題となる。すなわち、水表面では光の透過、熱の移動、気体の出入りなどがあり、底面では沈澱や再溶出などがある。またとくに、温度躍層が存在した場合、その密度分布から $d^2\rho/dz^2 = 0$ の面を温度躍層面とすると、この面を通しての物質移動量の大きさは水質の鉛直分布に重大な影響を及ぼす。

貯水池の温度成層状態下において、停滞により池水が安定化して、水質の化学的成分も層を形成している分布状態を化学成層 (chemical stratification) と言い、とくに、底面付近における環境条件の特殊性による水質の成層分布を底成層あるいは小成層 (microstratification) と言い、底質との関係で特徴がある。

また流動と生物との関係では、生産活動は停滞水中で大きく、呼吸量は流動水中で大きいことがわかっている。

(1) 浮遊性物質 (SS), 濁度

これらの水質因子は、流入水によってもたらされる変化が主であり、浮遊性物質として沈降速度を有しているため、その鉛直分布との関係が注目される。とくに、停滞や循環における流動によっては沈降および再浮上現象となって現われるので、底面あるいは後述の躍層部付近での挙動は、とくに重要である。

SS には、高水の出水による無機的な濁質だけでなく、プランクトンも含まれ、生物の生体および死骸など有機性物質は分解など反応による変化を伴う。この両者ともその存在は光の透過を阻止し、他の水質因子にも影響を及ぼす。このうち出水による無機的な濁質の分布と流動状態の関係は後の第6章第2節において詳述する。

(2) 電気伝導度 (導電率), Cl^- など

電気伝導度あるいは導電率は、水の比電気抵抗すなわち比抵抗 ($\Omega \cdot cm$) の逆数を言い、 Ω/cm (mho/cm) あるいはその百万分の1の $\mu\Omega/cm$ の単位で表わし、水中の電解質との関係が密接である。すなわち、水中の溶存成分のうちの塩分や、蒸発残留物は電気伝導度との間にはほぼ直線的な関係がある。¹⁴⁾したがって、その測定の容易さと迅速さに加えて、連続測定や自動記録も可能なため、水質調査には欠かすことができないものである。そして、水中の塩分量を知るだけでなく、水体の混合状態、したがって、水塊の異同の判定にも利用でき、電解質をトレーサーとして用いれば平均流速の測定も可能である。また、水温変化に直線的に対応するので、水質成層だけでなく水温成層状態も知ることができる。電気伝導度 λ は、18℃の水温を標準状態として、 $\lambda_t = \lambda_{18} \{1 + \alpha(\theta - 18)\}$ によって表わされ、 α は 0.020 ~ 0.025 である。それゆえ、相対的な変化の他に、その数値を云々する場合は標準状態で行なう必要

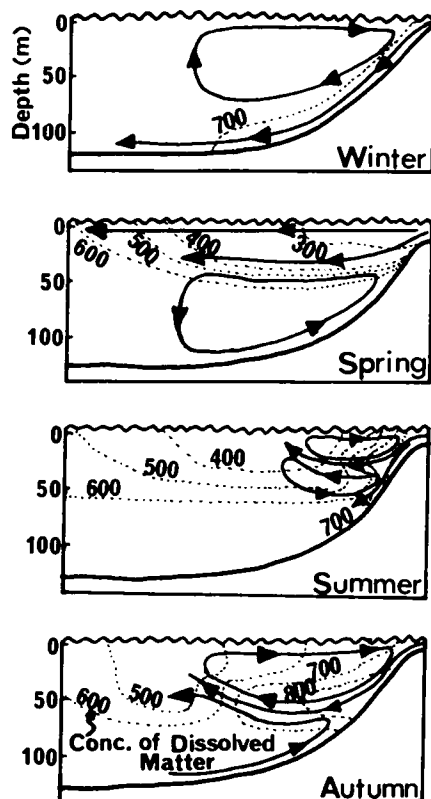


図2-8 Mead湖のフロー・パターン (Anderson²⁾)

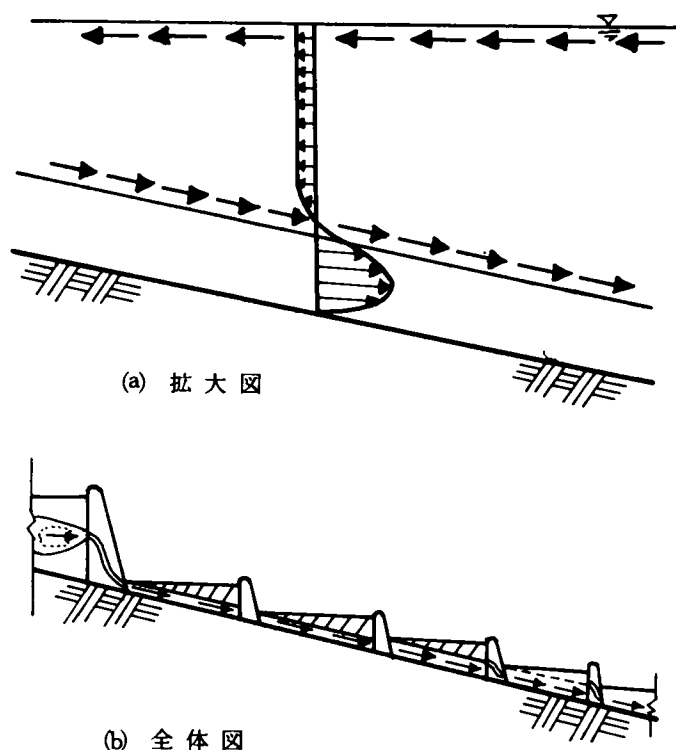


図 2-9 連続するダム群のフロー・パターン (Fry¹²⁾ et al.)

がある。

(3) 溶存酸素

溶存酸素は、他の水質因子と同様に、停滞や循環の流動状態にしたがって季節変化をするとともに、生物の光合成作用、呼吸および分解作用に伴う変化が加わる。すなわち、溶存気体として移流や拡散による輸送に、水表面を通して大気との間の再曝気現象が加わる。これには、風による水表面付近の乱れが大気との接触面積や表面更新の度合に大きな影響を及ぼす。また、溶存酸素は、生物分布の変化に支配される。すなわち、表水層上部ではその大きい光の透過量のために植物プランクトンや水草による光合成作用が著しく、溶存酸素は飽和あるいは過飽和の状態となる。もちろん、光量の日変化のため昼間は光合成作用、夜間は呼吸作用が大きく、溶存酸素の日変化も見られる。また、深水層では光量が少く、成層期には生物の呼吸作用と微生物による分解作用によって溶存酸素の使用量が供給量を上回り、溶存酸素は不足状態となり、とくに底層では完全な涸渇あるいは零に近い値となることが多い。さらに、成層期に植物プランクトンが多量に発生した場合、植物プランクトンの浮遊性物質としての沈降が温度躍層部では抑制され、その呼吸や分解に伴って躍層部において溶存酸素が非常に少くなることがある。

この溶存酸素鉛直分布の季節変化の特色は、図 2-10 に示す千叡貯水池の昭和 48 年膳棚地点の観測例からも明らかである。

(4) pH, アルカリ度

天然水の pH は一般に、溶存する二酸化炭素（遊離炭酸）と炭酸塩の割合によって定まり、地表水の pH

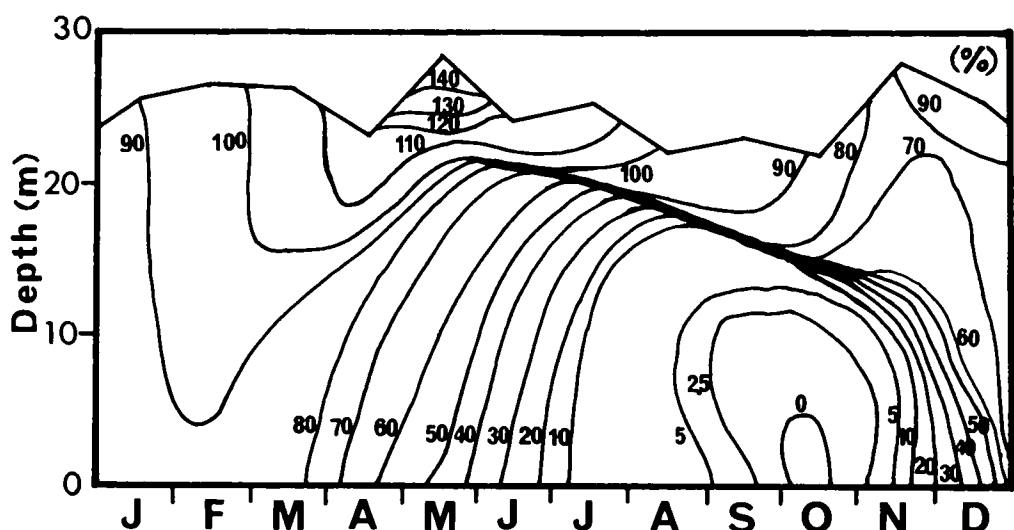
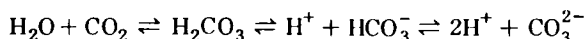


図 2-10 溶存酸素飽和度周年変化（千荷貯水池；膳棚地点，1973 年）

は 7 より少し高いことが多い。また、生物の光合成作用による溶存炭酸ガスの消費は pH の上昇をもたらす。生物の呼吸作用および微生物の分解作用による炭酸ガスの生成は pH の降下をまねく。すなわち、季節的には、日射量、水温および栄養塩濃度によって変化する光合成作用の増減に大きく左右され、さらに光量の関係から昼夜を通しての周日変化を示し、炭酸ガスの変化を介して溶存酸素の変化との対応が顕著である。

この二酸化炭素と炭酸塩濃度の変化と、pH の関係は図 2-11 に示され、つぎの化学式に従う。



また、水深方向の pH の変化は、透過光量、プランクトン濃度およびその光合成活性の大きい表水層上部では昼間 pH が高くアルカリ性を示し、細菌などによる分解作用が大きく、炭酸塩が豊富な深水層においては、pH は 7 以下となり微酸性を示す。炭酸ガスの水表面を通しての大気との間の移動量も pH に影響を及ぼす因子の 1 つである。

つぎに、アルカリ度は水中の弱酸イオン（炭酸物質、ケイ酸、ホウ酸、リン酸、腐植酸など）を遊離させるのに要する水素イオンの当量数で表わされるから、pH の安定性に影響を与える。そのほか、下水や工場廃水など有機汚濁水の影響によって著しく変化するので、水質汚濁の指標の 1 つと考えられている。¹⁵⁾ このアルカリ度の値の大きい層では pH は安定しており、温度躍層の上下での変化が著しい。

(5) プランクトン、クロロフィル a および一般細菌、大腸菌

プランクトン、細菌やそれらの遺がいおよび土壌粒子に共存する腐植物質は、水中の懸濁物質のうち生物学的因子として重要である。プランクトンの中でも植物プランクトンは、食物連鎖あるいは栄養レベルにおいて第 1 次生産として、光合成作用による無機性物質から有機性物質を生産する基礎生産量を支配する。そして、この植物プランクトンの種類と濃度は、その栄養塩濃度との関係から富栄養化現象

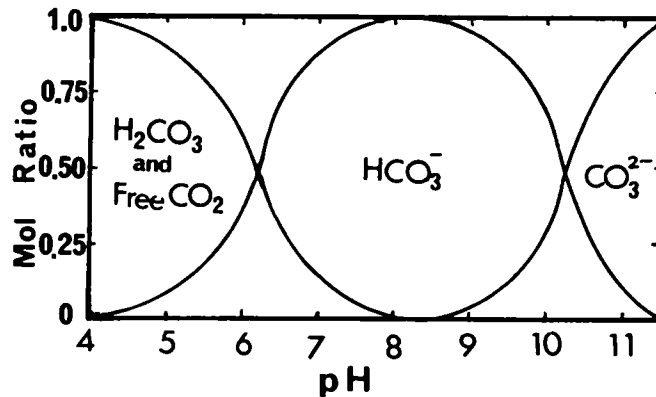


図 2-11 CO₂, 炭酸塩と pH の関係

において重要な因子である。また動物プランクトンは、植物プランクトンを捕食し増殖するため、濃度は植物プランクトンに左右される。植物プランクトンは種類と濃度によって生産が異なるため、光合成量との関係からクロロフィル a 色素量によって、全体としての濃度や生産量が判定されることが多い。このクロロフィル a 量や光合成活性によって 1 次生産量を推定することができる。

植物プランクトンは光量との関係から表水層に多く、浮遊性物質として沈降するが、動物プランクトンは運動を伴うものがあるため、その鉛直分布は変動が大きい。水温躍層を持つ貧栄養状態の貯水池における植物プランクトン数の季節変化は、春に高く夏に減少し、秋に少し高いピークを有する。¹⁷⁾

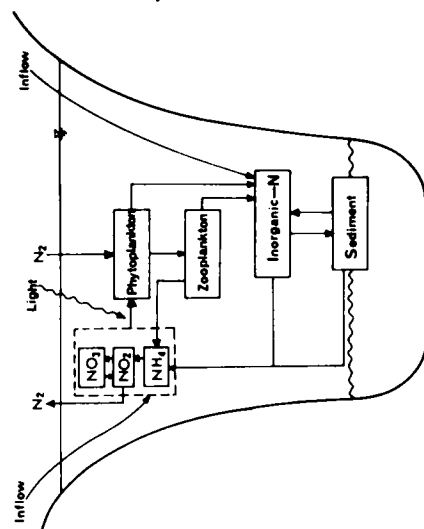
一般に、貯水池では流入河川より細菌数が減少するのが通例である。この細菌は、貯水池内で生物の遺がいやその他の有機物質を分解し、有機体から無機栄養塩への循環サイクル、すなわち、栄養塩の回帰に重要な因子の 1 つである。細菌の鉛直分布は、有機物質の濃度などに左右され、一般に浮遊性物質濃度の高い温度躍層部や深水層に多く、溶存酸素状態に従って好気性菌、嫌気性菌、通性嫌気菌の間に増減が見られる。

上水における水質試験項目では一般細菌と大腸菌とに分けられるが、有機性汚濁の少ない貯水池の中・下流部においては、大腸菌は少なく、ほぼ零に近いこともある。

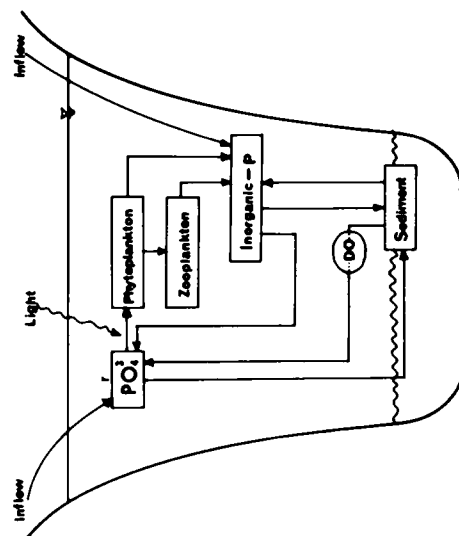
(6) 窒素、リン、過マンガン酸カリウム消費量

窒素とリンは生物の栄養塩として必須のものであり、その濃度はしばしば生物増殖の制限因子となっている。そして、この窒素化合物とリン酸塩は食物連鎖を通して次々と利用され、最終的な分解の後、底層から表水層への回帰も見られる。この循環サイクルは炭素も含めて図 2-12 に模式的に示される。また、窒素とリンは栄養塩として過剰に存在すれば、植物プランクトンの異常発生など富栄養化現象と関連する。富栄養化の限界として窒素 0.2 ppm、リンは 0.02 あるいは 0.015 ppm の濃度と考えられ、とくにリン濃度は窒素濃度に比して小さいが、多くの湖沼において富栄養化のカギを握る因子とされている。

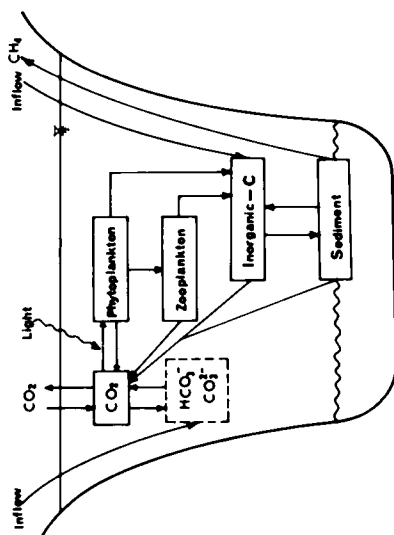
また、過マンガン酸カリウム (KMnO₄) 消費量は有機性汚濁指標として重要な因子であり、とくに上



(a) 窒素の循環



(b) リンの循環



(c) 炭素の循環

図 2-12 窒素, リンおよび炭素の循環

水・工業用水関係では BOD の測定がなされない場合が多く、これらに代るものとして用いられる。

窒素化合物とリン酸塩は有機性(態)と無機性(態)に分けられるが、富栄養化現象では植物プランクトンに直接摂取される無機性のものが重要である。すなわち、窒素化合物ではアンモニア性(態)、硝酸性(態)、亜硝酸性(態)の3つが重要であり、リン酸塩では水中に溶けだした PO_4^{3-} の形のものであり、pHによっては HPO_4^{2-} 、 H_2PO_4^- 、 H_3PO_4 の場合もある。そしてこの窒素、リンとも貯水池の物質代謝において、植物プランクトンや細菌などの活性やそれ自体の物質変化を通して生物の生産性に寄与することになる。

(7) マンガン(Mn)、鉄(Fe)

マンガンおよび鉄は天然水中に存在する主要な元素であり、両者が共存している場合が多く、その溶存状態は類似している^{2, 14, 15)}。すなわち、マンガン、鉄とも溶存酸素の不足した状態では2価の可溶性のイオンとして存在し、溶存酸素が豊富な状態下ではマンガンは4価、鉄は3価の不溶性沈澱を形成して底質中に主として存在する。したがって、貯水池成層期の深水層においては、溶存酸素の涸渇に伴ない、マンガンおよび鉄は底質から溶出して2価のイオン状態となり、マンガンはかつ色から類黒色、鉄は茶かつ色から赤かつ色の着色を生ずる。

このマンガンおよび鉄の底層付近における溶存酸素濃度との関係を含めた挙動は、水体と底質との間の物質移動として重要である。すなわち、深水層におけるマンガンや鉄の水酸化物の存在は、単独ではイオン状態あるいは溶解状態にある物質を共沈させて底層に運搬する。底層での還元により2価のイオンとなって、マンガンや鉄の水酸化物が溶解すると、共沈物質も底質から溶出して深層水中に濃縮される。この現象は微量物質ほど著しい。

第4節 水温分布・流速分布・水質分布

貯水池において水温は、物理的には水の密度や粘性を支配し、その分布状態によって流動や水質変化は多大の影響を受ける。すなわち、比熱の大きい水体と天空の間には、太陽エネルギーを中心とした受熱と放熱という熱平衡化過程を通じて、貯留水は1年を周期とする水温変化サイクルを繰り返す。貯水池内の水温変化の特性は水深によって異なり、多分に貯水池内の流動との密接な相互関係を有する。貯水池の流動あるいは流速分布は、水体の混合度や実質滞留時間などで水質に影響を及ぼし、水体内での水質分布に偏りをもたらす原因となっている。そして、水質は水温の他に、懸濁物質や溶解性物質の濃度差による密度流のために流動にかなりの影響をもたらし、流速分布と関連することもある。また、水温は化学的には化学物質の溶解度や反応速度、生態学的には生物の生産や呼吸を含めた生物活性への影響が大である。

このように水温分布・流速分布・水質分布の三者は相互に密接な関係があり、個々の分布の変化は他の分布に直接および間接的な変化をひき起こし、大きな影響を及ぼし合うことが多い。とくに温度成層した場合、水温および流速の鉛直分布の急変部では、各種水質成分のその上下への混合度が小さくなり、物質移動量が制限されて水質分布に偏りを生じさせる原因となっている。また、貯留水は流出部分と残留部分にわかれるが、流速変化はその各水塊の実質滞留時間分布を支配する。すなわち、停滞や循環のフロー・パターンによって実質滞留時間が異なり、主流域(main flow)と死水域(dead zone)の関係からも成層

の有無およびその強度の違いによる混合の状態を把握することができる。

このように水温・流速・水質の鉛直分布はそれぞれの急変部の位置関係、およびその変化の割合（勾配）によって相互に影響し合い、第2節で述べた鉛直安定度 E 、Richardson 数 Ri 、拡散係数 E_t の大きさを左右する。この三者の分布と物質移動量との関係については第5章第4節において詳述するが、この三者の関係が第5章の解析モデルの構成の基礎となるものである。

第5節 結 語

この章では、貯水池の水質変化の一般的な特性について、これに多大な影響を及ぼす流動パターンや水温分布との関連を含めて議論を進めた。こうした一般的な水質変化特性に関する知識は、実際の貯水池観測や模型実験の予備的検討に役立ち、水質変化の解析的研究の基礎をなすものである。とくに、水温・流速・水質の鉛直分布の季節変化パターンは、水質変化の解析モデルの構成において基盤となる重要なものである。

第2節フロー・パターンにおいて、通常1年を表2-1のように6つに分ける。また、成層状態の安定性や性や水体の混合度を判定するのに用いられる指標の鉛直安定度や Ri 数などについても触れている。

第3節貯水池の水質特性では、各種の水質因子のうちその分布特性から、共通に取り扱えるものをグループ別にまとめて示した。とくに、溶存酸素、窒素、リンなどの栄養塩類、植物プランクトンなどは、貯水池の水質汚濁や富栄養化現象との関連から注目すべきものである。

第4節水温分布・流速分布・水質分布においては、成層期における三者それぞれの鉛直分布急変部の相互の位置関係が、成層した各層間の混合度や物質移動量を支配することを述べた。

参 考 文 献

- 1) 吉村信吉：「湖沼学」 pp. 1 ~ 387 三省堂 (1937)
- 2) 山本莊毅編：「陸水」 pp. 25 ~ 39 (新井正) pp. 181 ~ 256 (堀内清司) 共立出版 (1968)
- 3) 新井正・西沢利栄：「水温論」(水文学講座10) pp. 146 ~ 218 共立出版 (1974)
- 4) G. E. Hutchinson: "A Treatise on Limnology" Vol. 1, John Wiley & Sons. (1957)
- 5) 西村昭二：「人工湖水温の特異性」水温の研究 Vol. 1, No. 2, pp. 25 ~ 32 (1957)
- 6) 合田 健：「上水浄化における水理学上の諸問題」京都大学学位論文 (1956)
- 7) 小島貞男：「貯水池における水の流動について」水道研究, No. 40, pp. 13 ~ 23 (1960)
- 8) T., Goda: "Density Currents in a Impounding Reservoir" Proc. 8th Congress of I.A.H.R. (1959)
- 9) 新井 正：「田子倉貯水池の水温構造について(1), (2)」地理学評論 Vol. 36, No. 10, pp. 590 ~ 601 (1963) Vol. 40, No. 9, pp. 476 ~ 487 (1967)
- 10) 新井 正：「最近の湖沼水温の研究(3)」水温の研究, Vol. 7, No. 3, pp. 24 ~ 27 (1963)
- 11) Sauer, J. F. T. and E. R. Anderson: "The Heat Budget of Body of Water of Varying Volume."

Limnol. and Oceanogr. Vol.1, No.2 pp.247~251 (1956)

- 12) Fry, A. S., M. S. Churchill and R. A. Elder : "Significant Effects of Density Currents in TVA's Integrated Reservoir and River System." Proc. 5th Congress of I.A.H.R. pp.335 ~354
- 13) 堀内清司, 安部喜也 : 「美和貯水池における水の流動と水温」 地理学評論Vol. 34, pp. 268 ~ 279 (1961)
- 14) 半谷高久 : 「水質調査法」 pp. 161 ~ 301, 丸善 (1960)
- 15) 小島貞男, 三村秀一, 菅野明男 : 「上水・井戸水の分析」 (フィールド・ワークシリーズ) pp. 72 ~ 224, 講談社サイエンティフィク (1974)
- 16) 小山忠四郎, 半田暢彦, 杉村行勇 : 「湖水・海水の分析」 (フィールド・ワークシリーズ) pp. 10 ~ 123, 講談社サイエンティフィク (1972)
- 17) 藤永太郎編 : 「琵琶湖の動態」 pp. 223 ~ 239, 時事通信社 (1974)

第3章 貯水池観測による水質変化の研究

第1節 概 説

貯水池の水質変化の研究には、その一般的な知識のもとに、実際の貯水池で観測を行なうことが不可欠である。貯水池にはその一般的な性質に、それぞれ個々の貯水池の特性が加わる。したがって、貯水池についての水質変化機構を知るには、実際の観測調査により、貯水池に共通する一般性やその貯水池だけの特殊性を見きわめなければならない。貯水池の実際観測は、千莉貯水池において、昭和48年10月から昭和49年11月までの約1年間、水質変化の1年サイクルを把握するために行なった。千莉貯水池は、兵庫県武庫川水系の羽東川にあり、神戸市、三田市、宝塚市にまたがる水道および工業用水道専用の貯水池である。その背水域は、図3-1のように羽東川と波豆川の合流点のそれぞれ約1.5km上流からダム堰堤までの約7kmである。貯水池の型式、規模の諸元は表3-1に示すとおりである。¹⁾²⁾最高水深約33mを有す堰堤前部の中央付近にある取水塔には、表面から底面への水深方向に、約2.4mの中心間距離を有する取水口が図3-2および写真-1のように9個あり、水位や水質に応じて容易に選択取水できることがこの水道専用貯水池の利点である。

この貯水池への流入河川のうち主流である羽東川は、京都府亀岡市、船井郡園部町、大阪府豊能郡能勢町の境界付近に端を発し、能勢町天王地区、兵庫県多紀郡城東町籠坊温泉を流下し、合流点まで約26kmの流程である。一方、支流の波豆川は兵庫県宝塚市内を流下し、上流では四支流に分岐し、約6kmの流程である。この流域は図3-3に示すように、両河川とも農山村を流れるものであるが、瀬戸内気候帯に属するため降水量が全国平均の約 $\frac{2}{3}$ 程度と少く、波豆川（流量は羽東川の約 $\frac{1}{4}$ ）流域では古くからのかんがい用溜池が目立つ程である。そして、貯水池上流域には昭和48年10月現在で戸数約1,500戸が存在し、人口は約6,600人で主として農業を営んでおり、牛約500頭を有する畜産業も含まれる。このうち、波豆川流域では流程が短いにもかかわらず、河川に面して約580戸、2,400人が居住している。この上流二河川の人口および土地利用形態は表3-2にまとめて示されるように、田畑および果樹園などの農地が全流域面積の約8%程度で、宅地なども含めても平地は高々10%弱で、残りの90%が山林に占められる山村である。

第2節 水 質 調 査

2-1 水質調査

この千莉貯水池における観測は、昭和48年10月から昭和49年11月までの約1年間にわたって、2～3月を除きほぼ1カ月間隔で11回実施し、水質変化の1年のサイクルをカバーした。すなわち、10月23日、11月27日の秋季から冬季にかけての部分循環期から全循環期、1月11日の冬季部分循環期、そして4月から11月までは、水質変化と生物活動の活発な時期ゆえ、春季から夏季の部分循環期の4月5日、5月7日、6月6日、夏季停滞（成層）期の7月9日、8月6日、9月6日、夏季から秋季にかけ

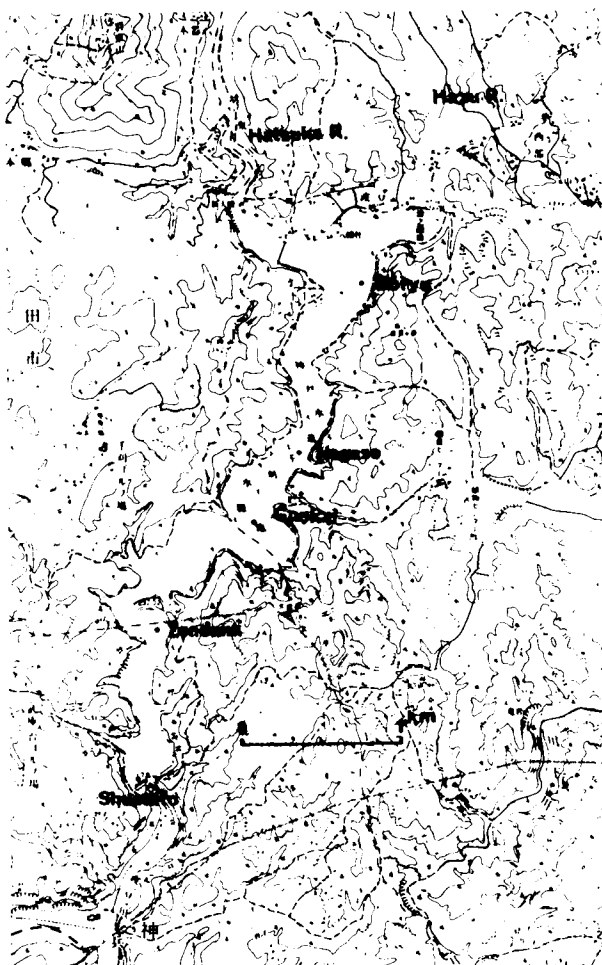


図 3 - 1 千苺貯水池図

表 3 - 1 千苺貯水池の概要

建 設	第一回工事；大正 3 年 5 月～大正 8 年 5 月 第二回工事；昭和 4 年 4 月～昭和 6 年 8 月（かさあげ 6 m）
ダ ム	直線型動えん堤（粗石モルタル積，表面張石） 堤 高 42.42 m 堤頂長 106.67 m 堤体積 41387 m ³
有効貯水量	11,612,000 m ³
湛水面積	1.12 km ²
有効水深	27 m
集水面積	94.5 km ²
池の周囲	23 km
取 水 口	満水面下 1.2 m から約 2.4 m ごと，20.6 m まで 9 ケ所
池底勾配	1/170

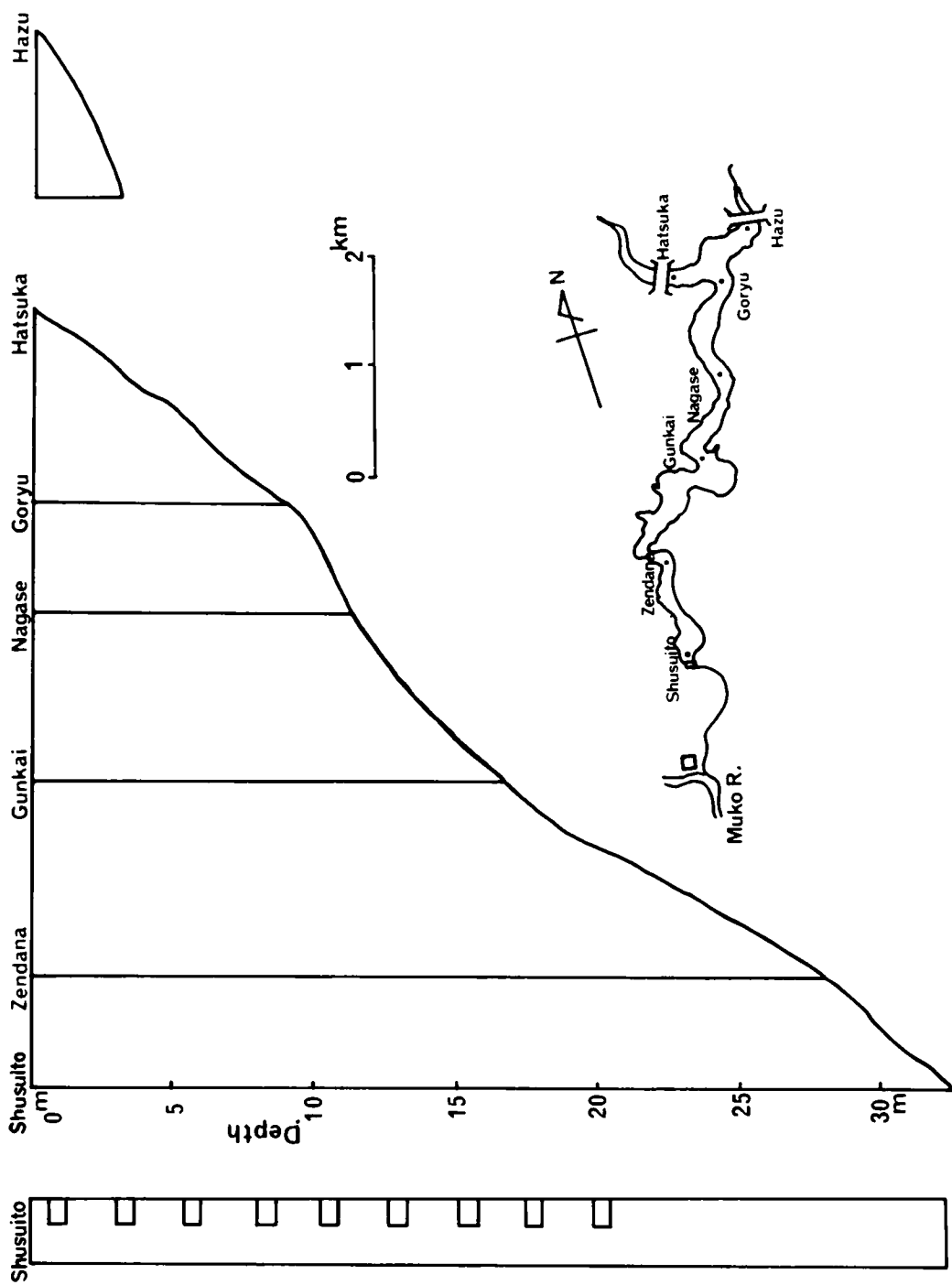
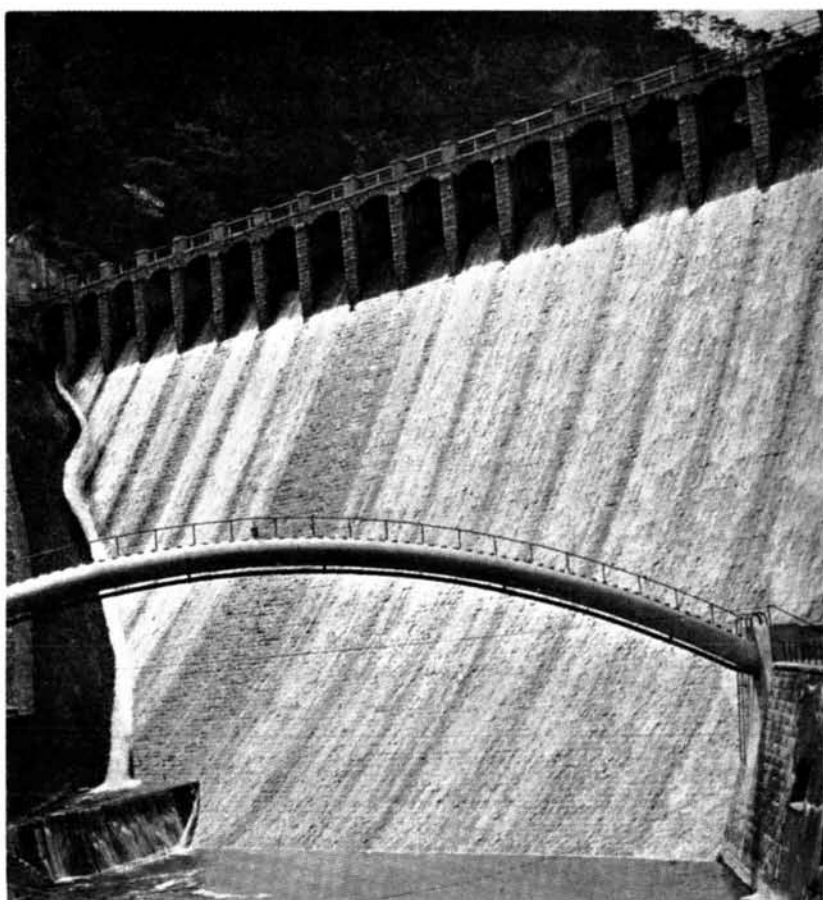


图 3—2 千苜貯水池概要図



写真－1 千苅貯水池(ダム)

ての部分循環期の10月7日、11月6日と1カ月間隔で、かつ、水深1 mごとの観測が特徴である。この観測は、貯水池の動力船および和船により、午前10時より午後2時までの4時間に流下方向に5地点、すなわち、取水塔前(最大水深約31 m)、膳棚(約26 m)、郡界(約16 m)、長瀬(約12 m)、合流点(約6 m)において、水深1 m間隔で採水および水温と電気伝導度の測定を行なっている。その後の約2時間は合流点付近における流動調査に用いられる。

現場における気温および水温の測定には、棒状水銀温度計(1/10℃目盛、30 cm)とサーミスター温度計(東邦電探、EST-3型)を併用し、電気伝導度の測定には電気水質計(東邦電探、EST-3型)を用いている。また、採水器は北原式B型中層採水器(離合社、容量約1ℓ)を用い、試料水は1ℓあるいは500 mlの白色ポリエチレン製試料びんに保存する一方、DO測定には102 mlのBODびんに試料水を満たし、硫酸マンガンを1 cc、アルカリ性ヨウ化カリウム1 ccを注入処理、いわゆる固定の後、研究室に持ち帰り、チオ硫酸ナトリウムで滴定する^{3,4)}。

池水の水質分析項目は、前述の水温、電気伝導度(現場と研究室の両方において)、溶存酸素、TOC、 PO_4^{3-} 、濁度、SS、クロロフィルa、けい光度である。その測定法は^{5,6,7,8)}表3-3に示すが、溶存酸素はウィンクラー変法、TOCは窒素ガスで無機態炭素除外の前処理の後、全有機炭素測定装置(柳

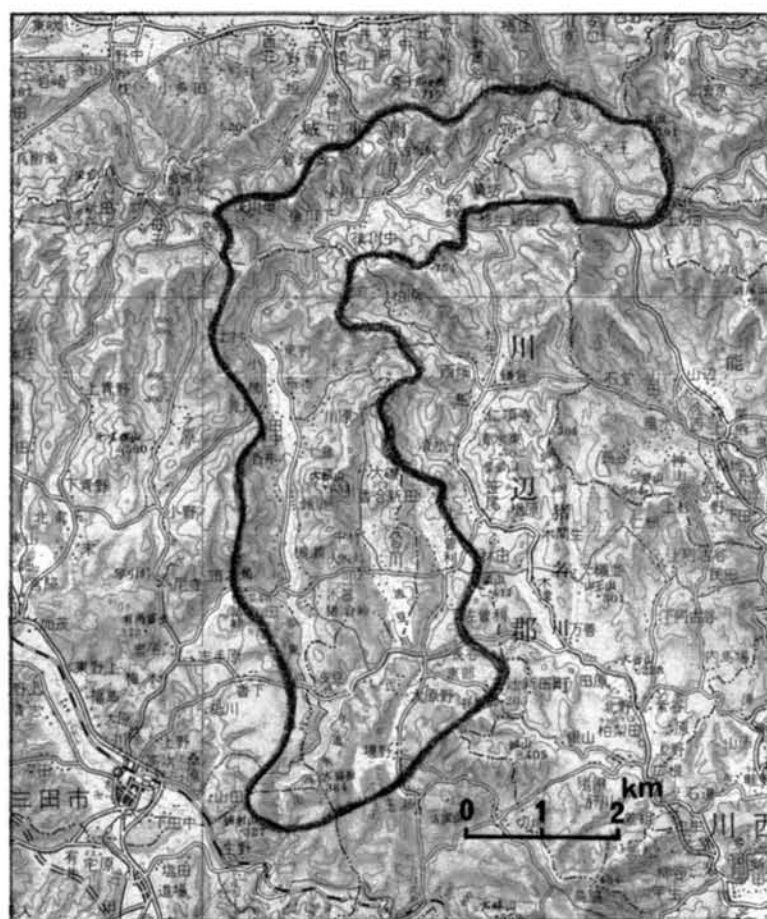


図 3 - 3 千苺貯水池流域図

表 3 - 2 千苺貯水池流域の戸数、人口および耕地面積（1973年2月）

項目 行政区	戸 数 (戸)	人 口 (人)	耕 地 面 積 (アール)		
			田	畑	果樹園
能 勢 町	64	298	3,361	91	12
城 東 町	181	754	7,600	300	2,000
三 田 市	755	3,487	38,660	881	492
宝 塚 市	497	2,061	19,458	1,029	4,186
合 計	1,497	6,600	69,079	2,301	6,690

表3-3 測定方法

測定項目	測定場所	測定法	使用機器等
水温	現場測定		棒状水銀温度計およびサーミスタ温度計
溶存酸素	現地固定 実験室測定	ナトリウムアザイド変法	
濁度	実験室測定	光電光度法	積分球式光電濁度計
SS	実験室測定	ミリポアフィルター法	ミリポアフィルター47mm (APタイプ)
導電率	現場および 実験室測定		電気水質計
PO_4^{3-}	実験室測定	モリブデン酸アンモニウム法	吸光分光光度計
TOC	実験室測定	メンツェル変法	全有機炭素測定装置
クロロフィルa	実験室測定	吸収法	吸光分光光度計
けい光度	実験室測定		けい光度計

本製作所 TOC-1) を用い、 PO_4^{3-} は誤差を防ぐため浮遊性物質を SS 用フィルターで除去した後、モリブデン酸法により分光光度計 (島津製作所、UV-200 型) で測定した。濁度は積分球式簡易濁度計 (日本精密工業、SEP-PT 型) を用い、SS は 1μ のメンブランフィルター (ミリポアフィルター社、A P タイプ) を使用し、クロロフィル a は 0.45μ のメンブランフィルター (東洋ろ紙、TM-2) でろ過してアセトン処理後、分光光度計 (前出) で測定した。けい光度はクロロフィル測定用のブルーランプ、およびフィルターを備えたけい光光度計 (米国ターナー社、111 型) によって測定を行なっている。以下に、11 回の観測の各回について、その水質分布の特色を概述するとともに、観測日の貯水池の状況を表 3-4 にまとめ、その各地点における各水質の鉛直分布を図 3-4 から図 3-11 までに一括して示す。

採水は同じ手順で行なったため、同一地点はほぼ同じ採水時刻であったが、各地点ごとでは 30 分前後の時間遅れがあった。しかし、貯水池内の水質は安定した変化を示すので、この程度の時間差の水質変化に与える影響は小さいものと考えられる。

また、著者らが測定しなかった 6 つの水質項目について、神戸市水道局の毎月観測値から図 3-4 ~ 図 3-11 と同じ観測月のものを参考のため図 3-12 ~ 図 3-16 に示すことにする。

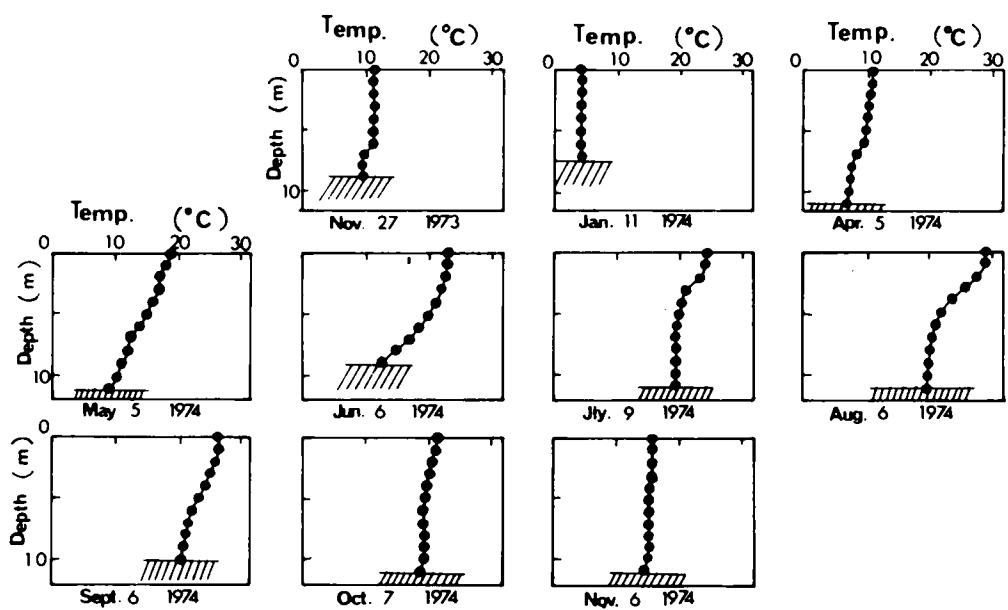
第 1 回 (昭和 48 年 10 月 23 日) 観測結果

この時期は成層末期にあたり、水深 25 m 以上の地点の膳棚、取水塔前では水深 15 m から 20 m の付近に依然とした温度躍層が存在している。しかし、この温度躍層は降下しながら消滅する状態にある。

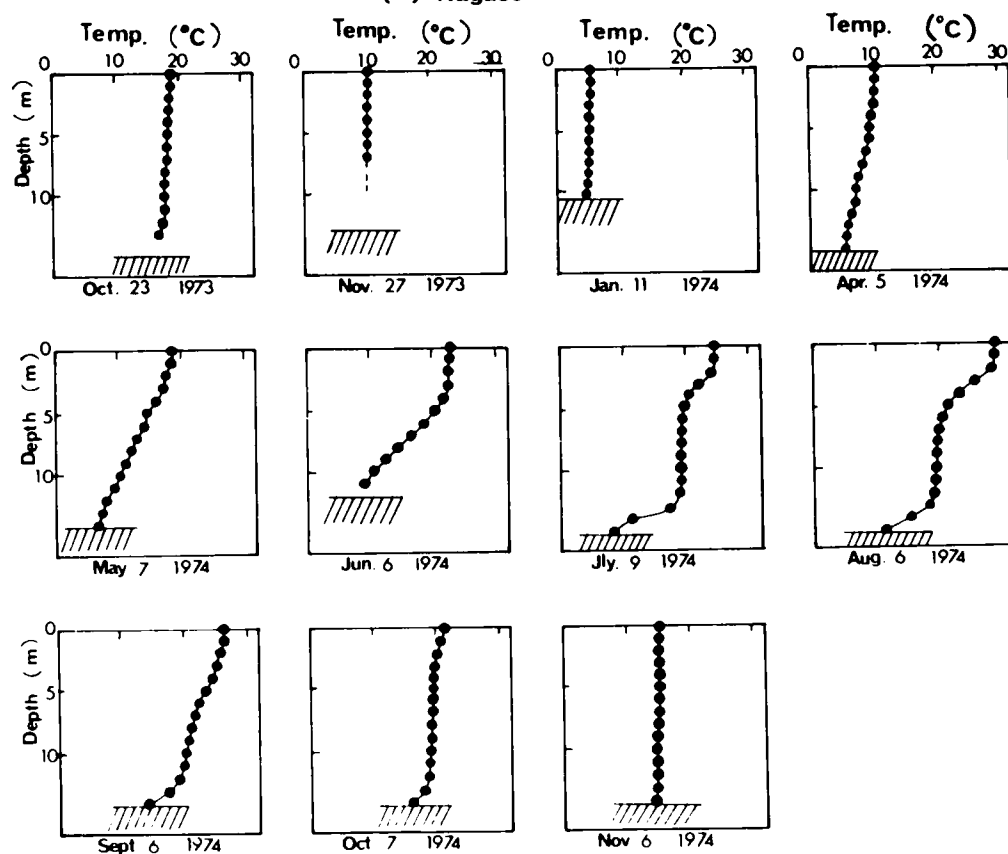
また、この時期は、6 月から 9 月までの温水状態が、10 月 14 日の強雨に伴う出水で水位がかなり回復しかけた頃であり、出水による流入水の流過経路をその濁度、SS、および導電率の鉛直分布 (図 3-6 ~ 図 3-8 参照) より認め得るが、これについては後の(II)流動調査で詳述する。そして、温度躍層

表3-4 観測日の状況および測定点

回数	年 月 日	天 候		水 位 (満水面基準) (m)	合計流入水量 (m ³ /day)	取 水 量 溢 余 水 量 (m ³ /day)	取 水 位 置 (満水面より) (m)	測 定 点						
		前日	当日					羽束 川	波豆 川	合流 点	長瀬	郡界	膳棚	取水 塔前
1	昭和 48.10.23	雨	晴	－ 1.520	267,120	124,040 0	6.06 8.48	×	×	○	×	○	○	○
2	48.11.27	晴	晴	－ 2.000	41,020	149,400 0	6.06 8.48	○	○	○	○	○	○	×
3	49. 1.11	晴	晴時々 雪	－ 4.921	21,220	71,670 0	8.48 10.91	×	×	○	○	○	○	○
4	49. 4. 5	晴	雨 晴	－ 0.270	52,440	86,130 0	6.06 8.48	×	×	○	○	○	○	○
5	49. 5. 7	晴	晴	－ 0.421	76,450	159,150 0	6.06 8.48	×	×	○	○	○	○	○
6	49. 6. 6	曇 雨	晴	－ 2.478	111,740	145,810 0	10.91 13.33	×	×	○	○	○	○	○
7	49. 7. 9	晴	晴	＋ 0.082	881,840	123,560 833,520	10.91 13.33	×	×	○	○	○	○	○
8	49. 8. 6	晴	晴	＋ 0.012	100,620	63,490 15,340	8.48 10.91	×	×	○	○	○	○	○
9	49. 9. 6	晴	晴	－ 0.206	79,180	175,260 0	8.48 10.91	×	×	○	○	○	○	○
10	49.10. 7	晴	晴	＋ 0.003	167,770	156,880 14,250	6.06 8.48	×	×	○	○	○	○	○
11	49.11. 6	晴	晴	－ 0.091	110,810	165,880 0	6.06 8.48	×	×	○	○	○	○	○

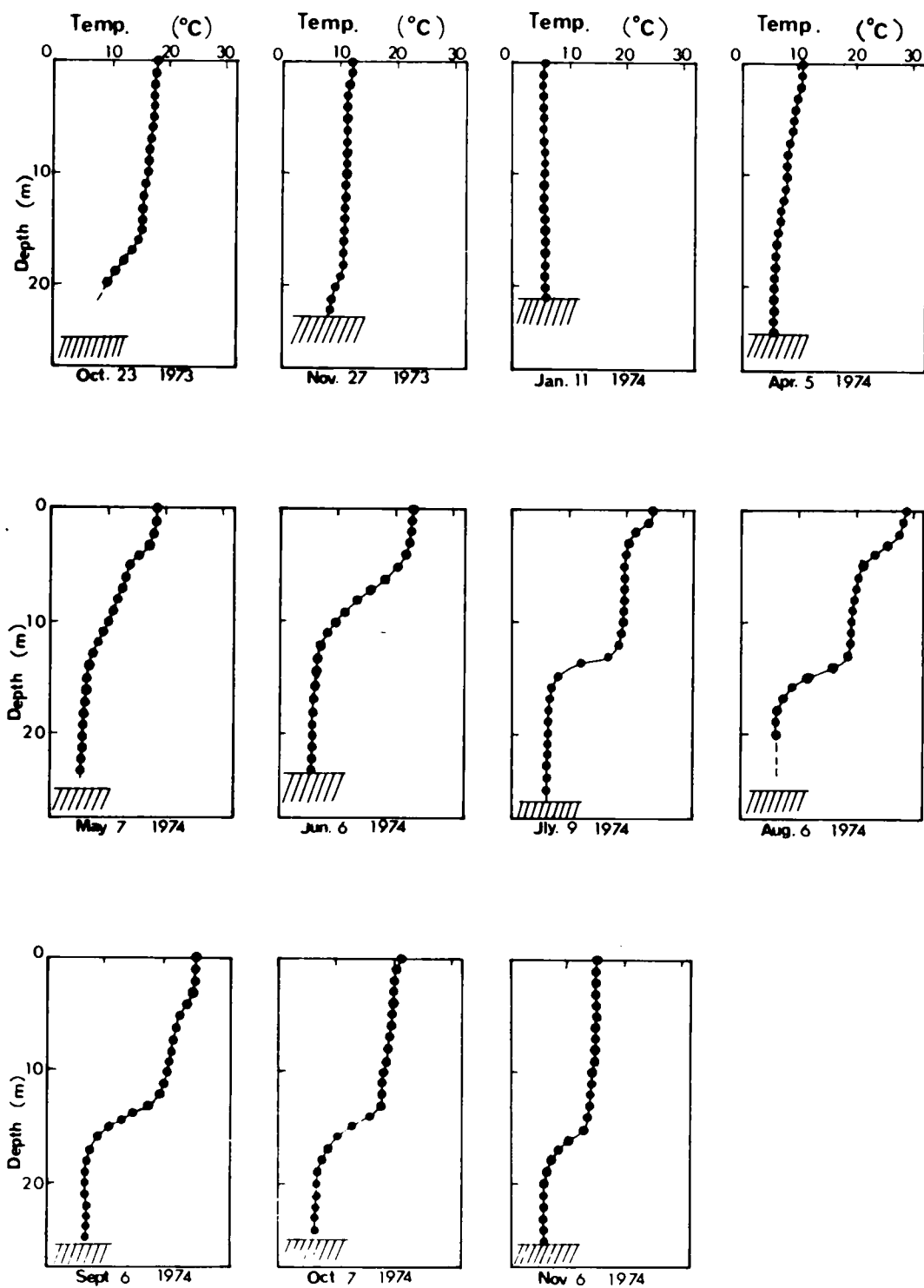


(a) Nagase



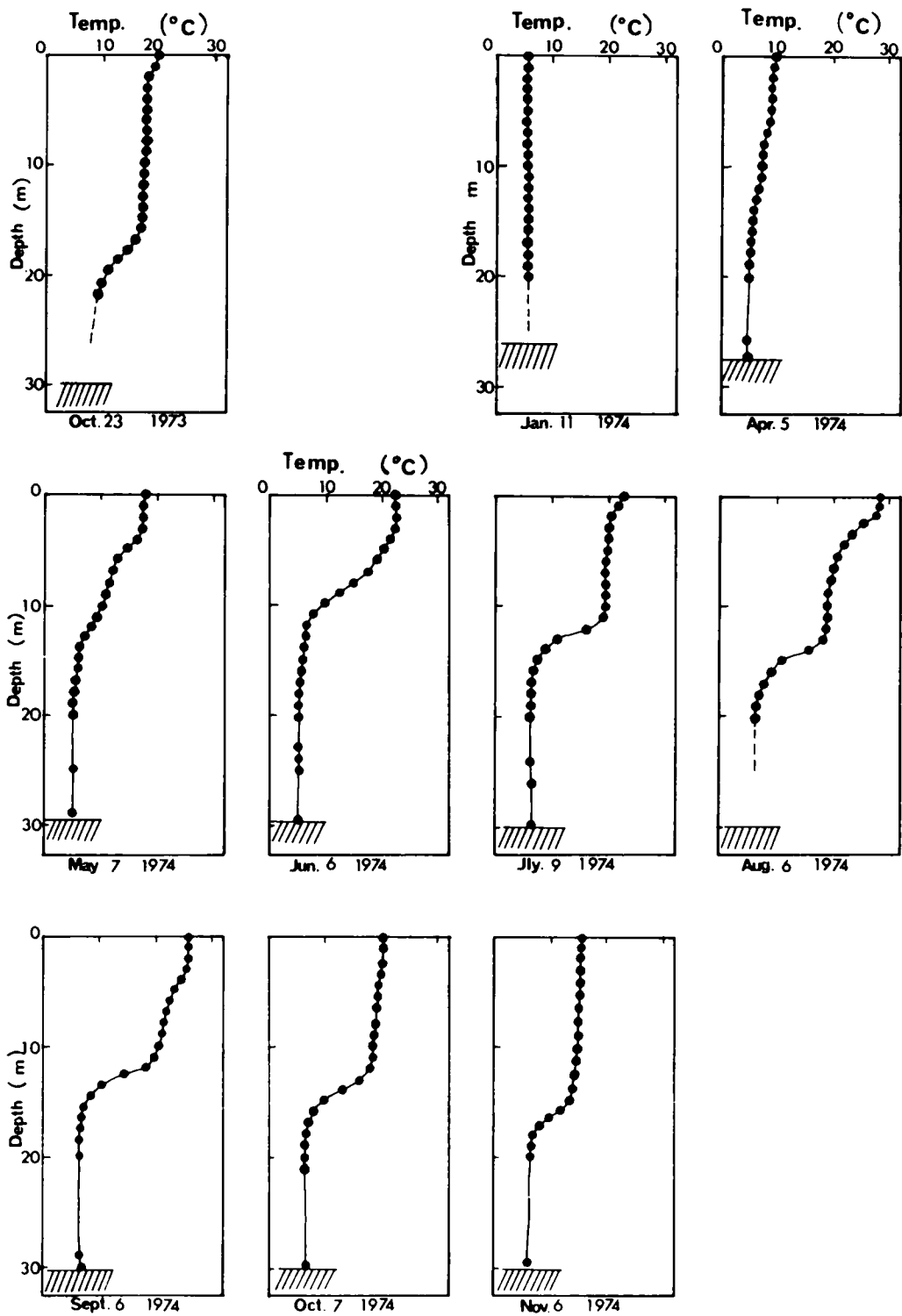
(b) Gunkai

図3-4 (a), (b)水温の鉛直分布(長瀬, 郡界地点)



(c) Zendana

図 3 - 4 (c)水温の鉛直分布(膳棚地点)



(d) Shusuito

図 3 - 4 (d)水温の鉛直分布 (取水塔前地点)

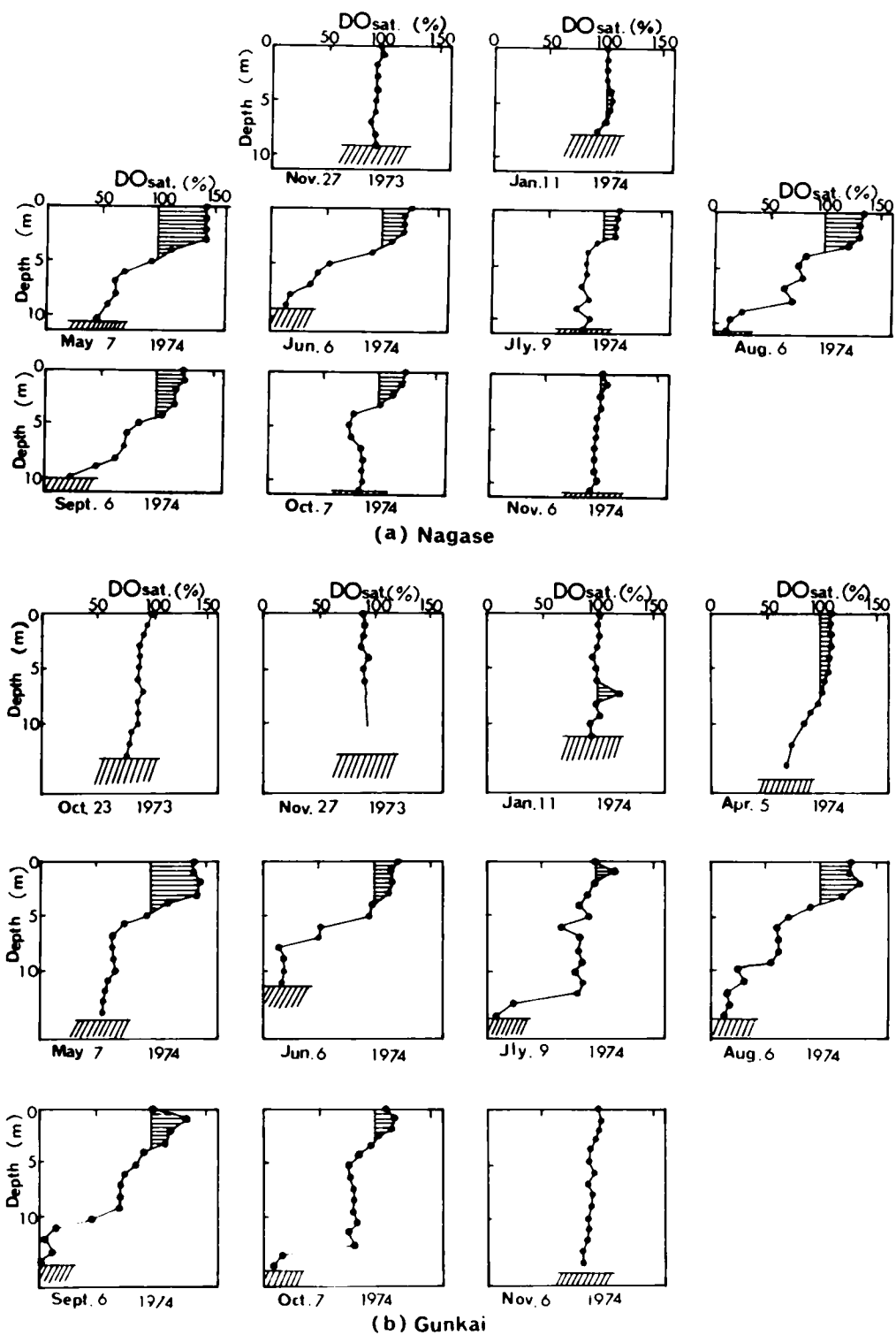


図 3-5 (a), (b) DO 飽和度の鉛直分布 (長瀬, 郡界地点)

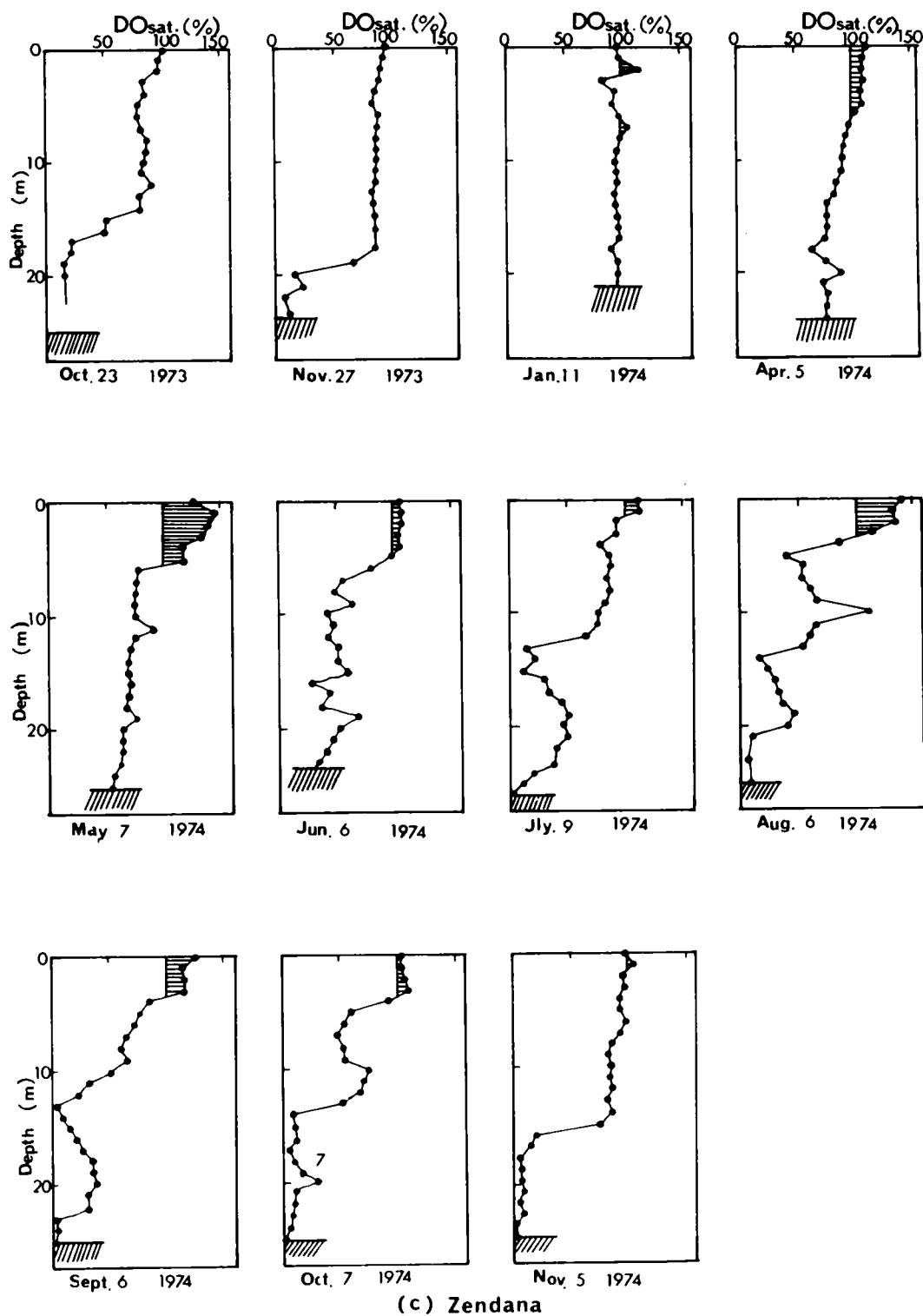


図 3 - 5 (c) DO 飽和度の鉛直分布 (膳棚地点)

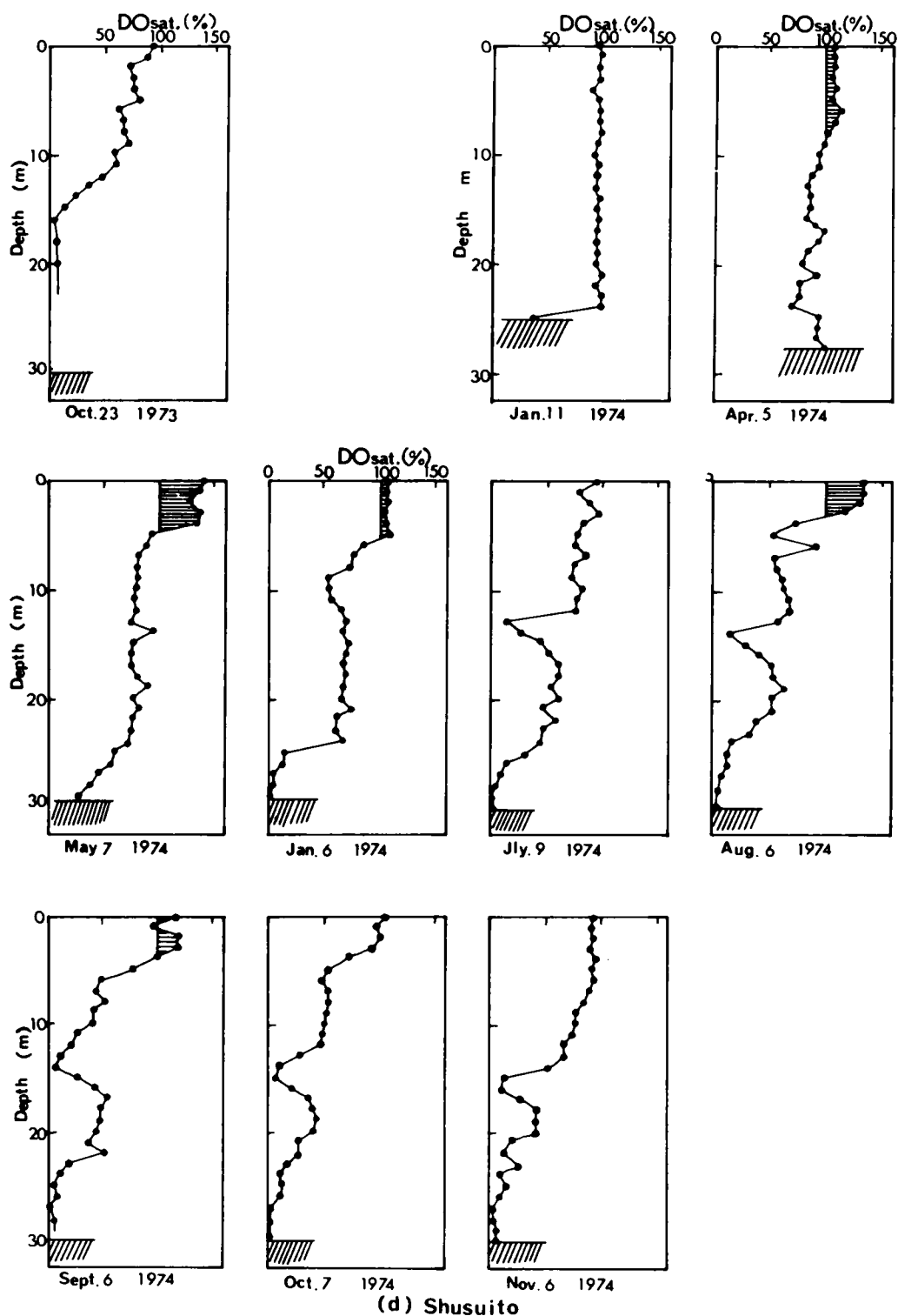


図 3 - 5 (d) DO飽和度の鉛直分布 (取水塔前地点)

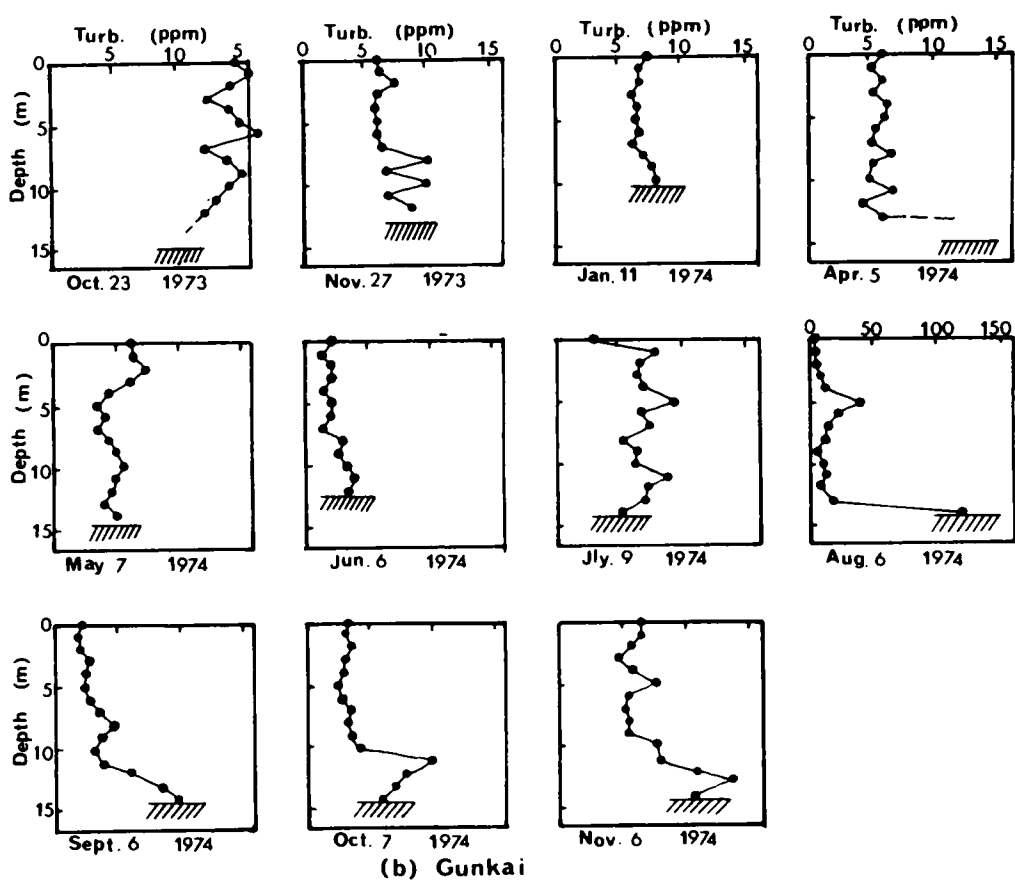
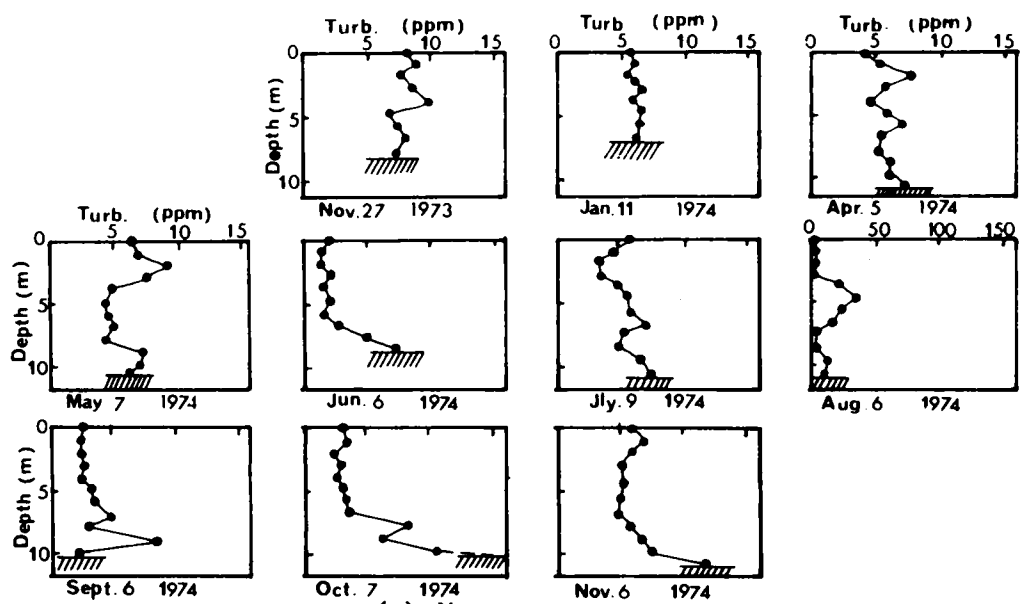
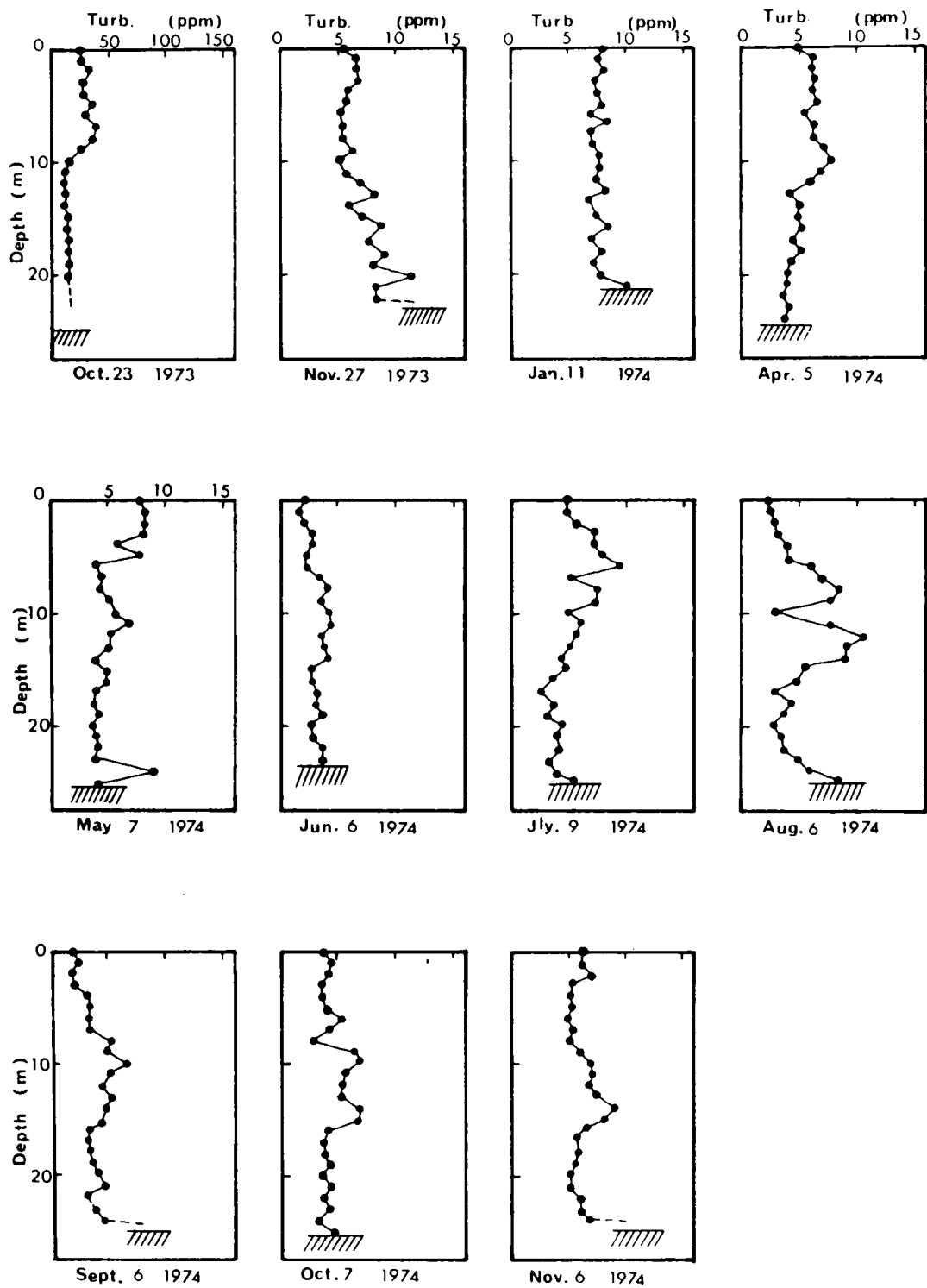


図 3-6 (a), (b) 濁度の鉛直分布 (長瀬, 郡界地点)



(c) Zendana

図 3 - 6 (c) 濁度の鉛直分布 (膳棚地点)

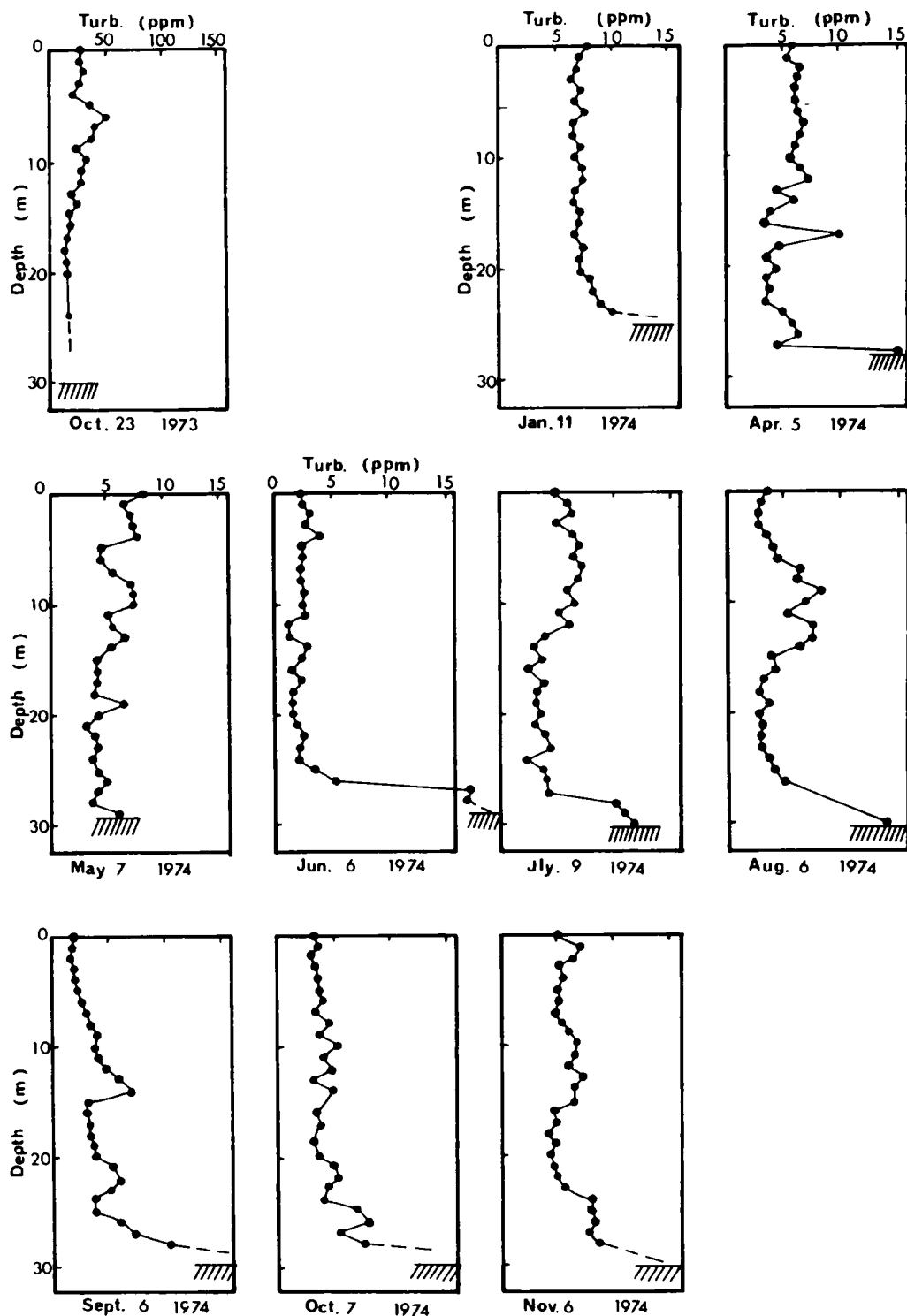


図 3 - 6 (d)濁度の鉛直分布(取水塔前地点)

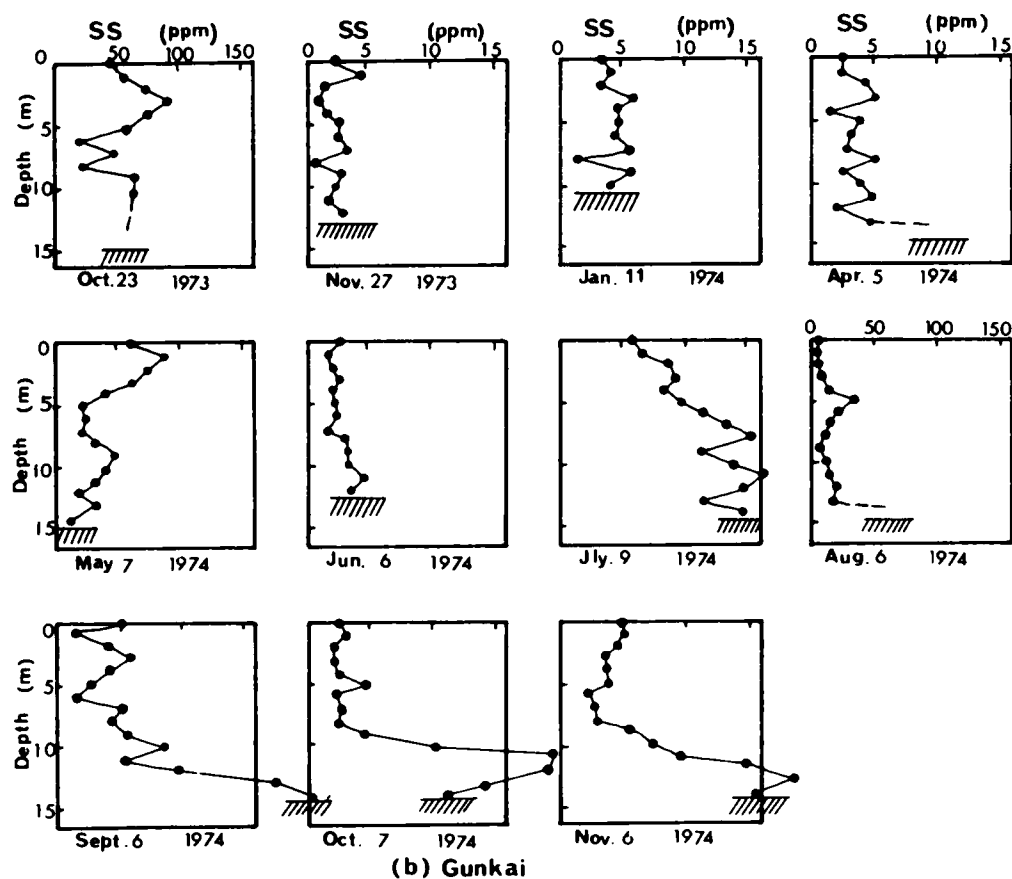
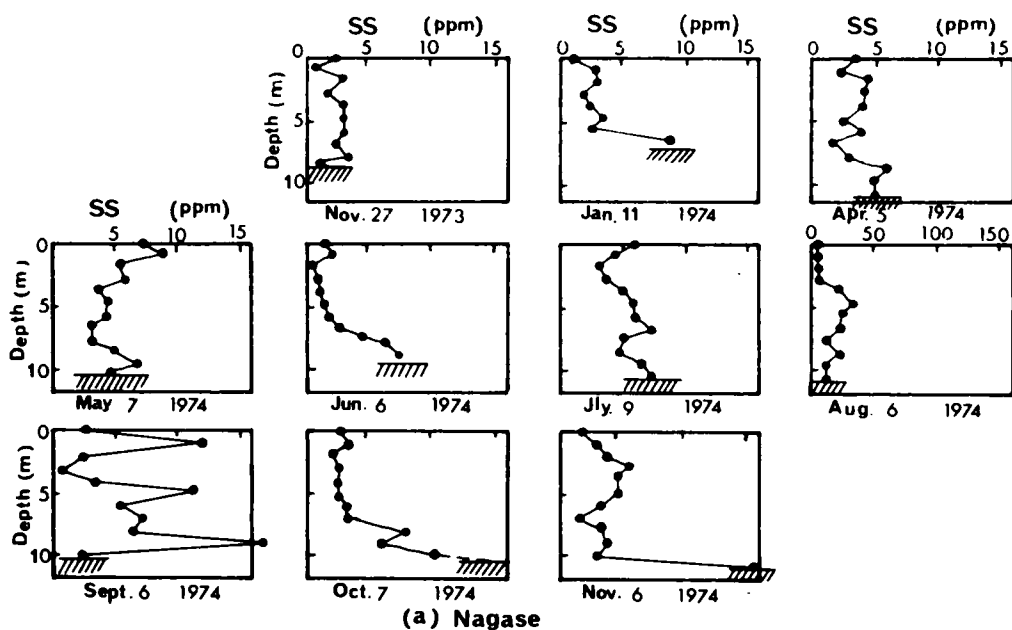
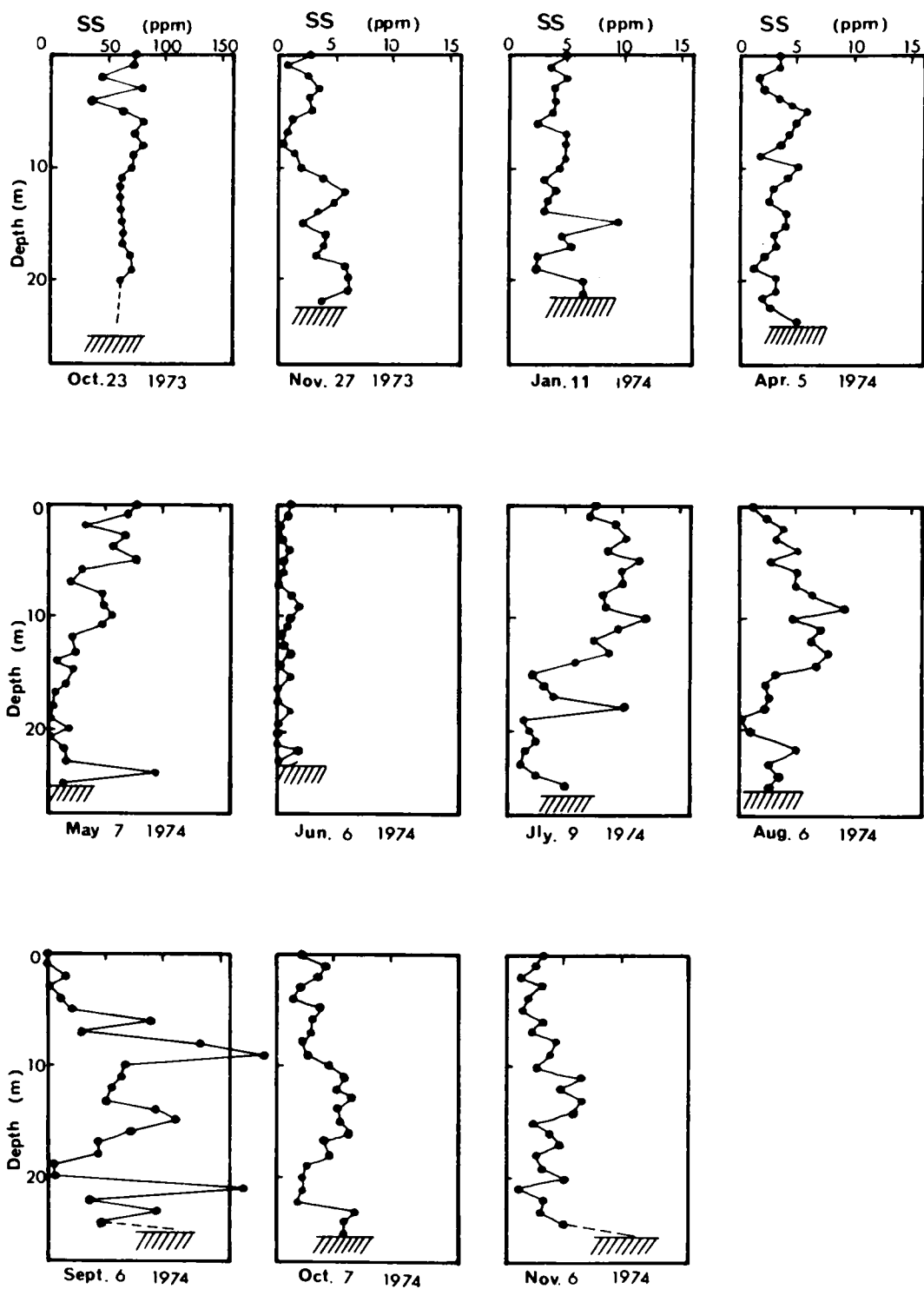


図 3-7 (a), (b) SS の鉛直分布 (長瀬, 郡界地点)



(c) Zendana

図 3-7 (c) SS の鉛直分布 (膳棚地点)

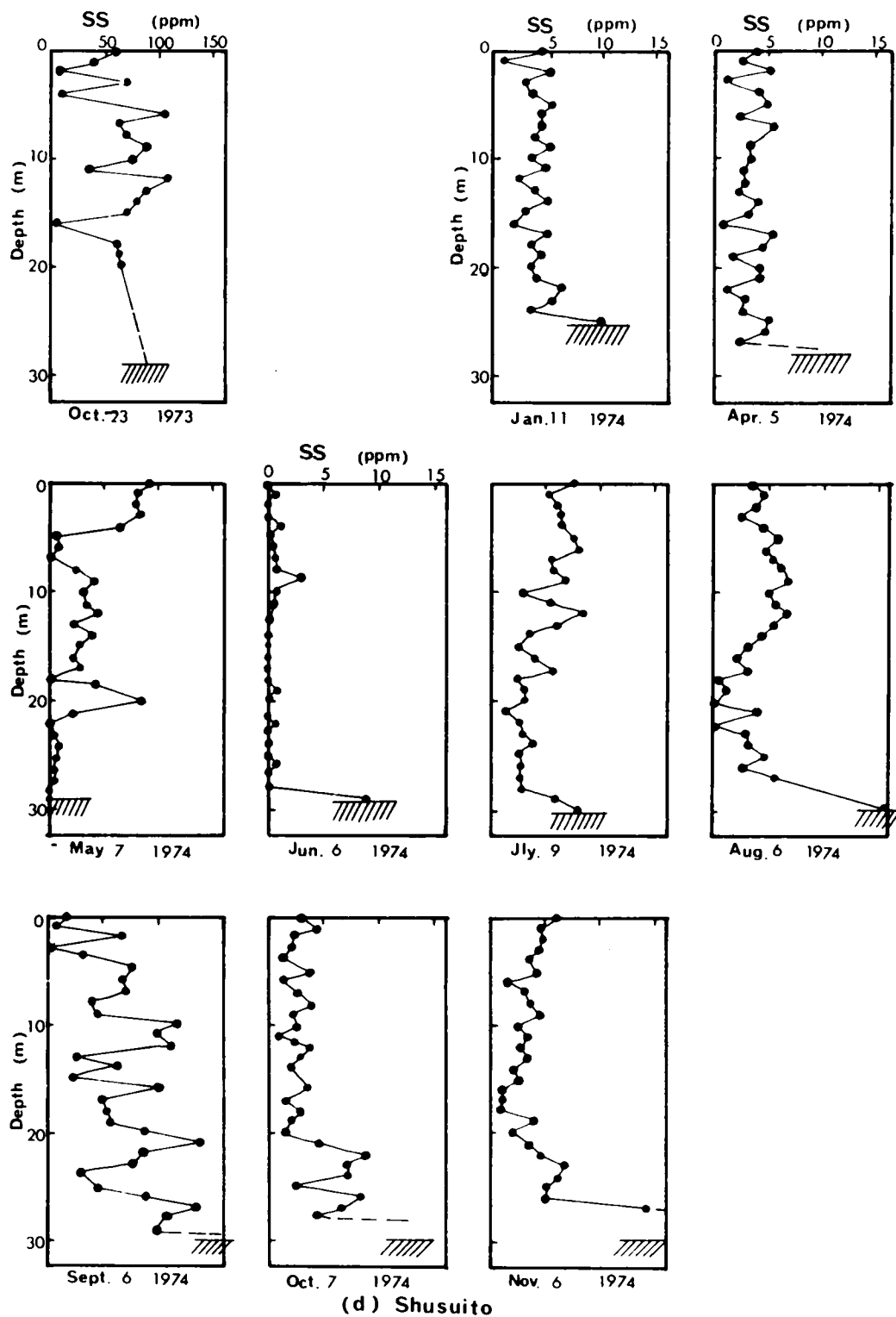


図 3-7 (d) SS の鉛直分布 (取水塔前地点)

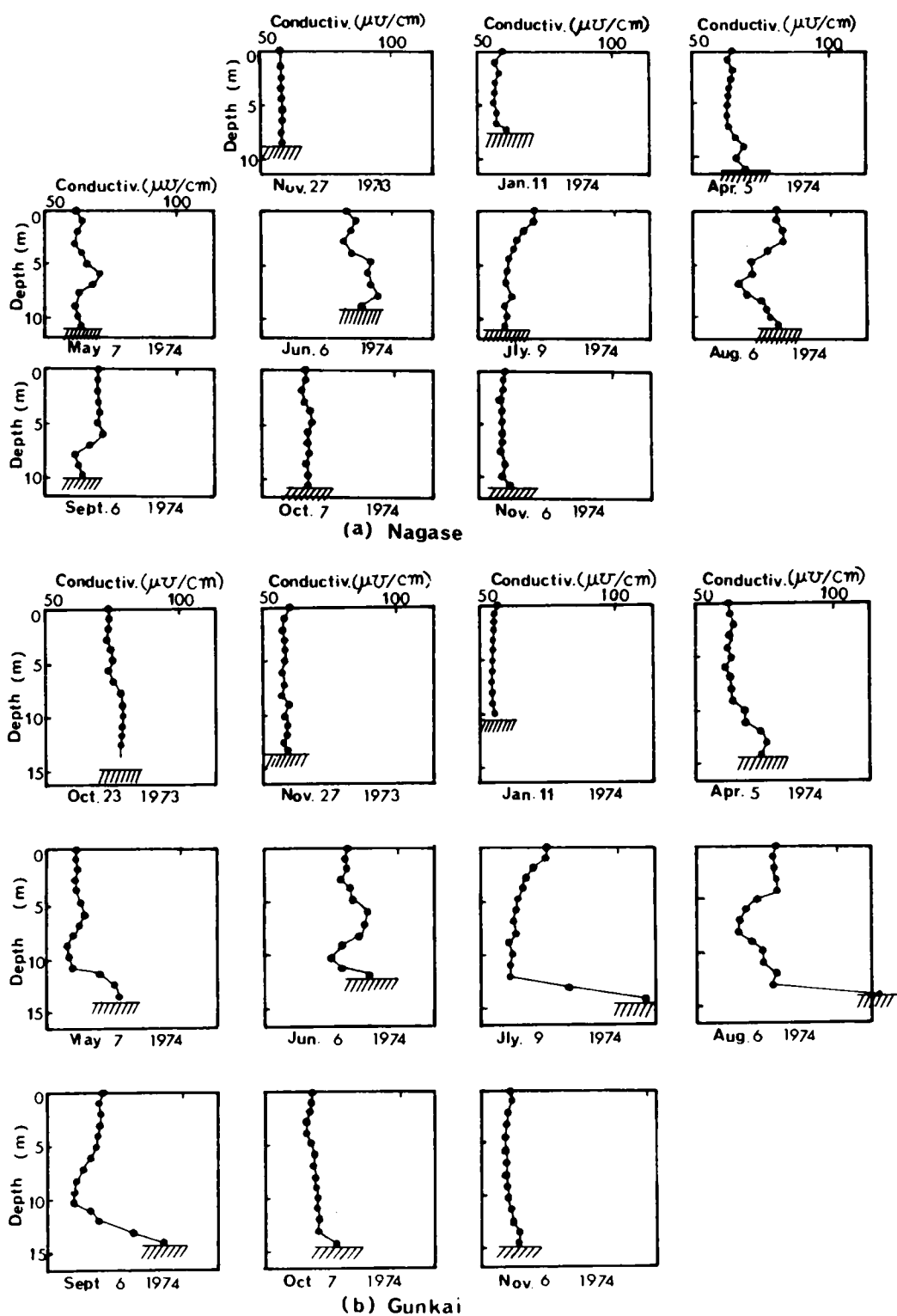


図3-8 (a), (b) 導電率の鉛直分布 (長瀬, 郡界地点)

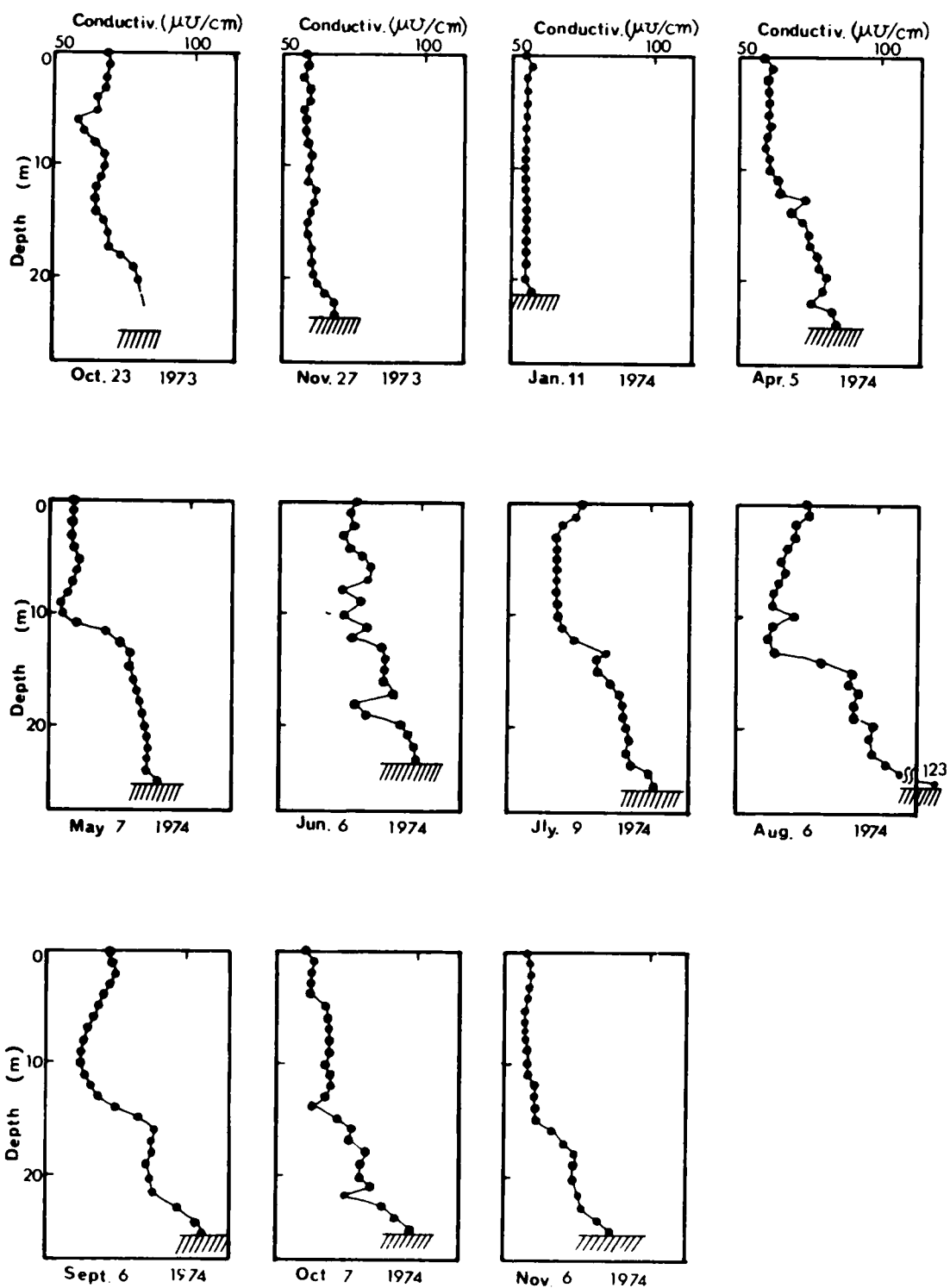


図3-8 (c)導電率の鉛直分布(膳棚地点)

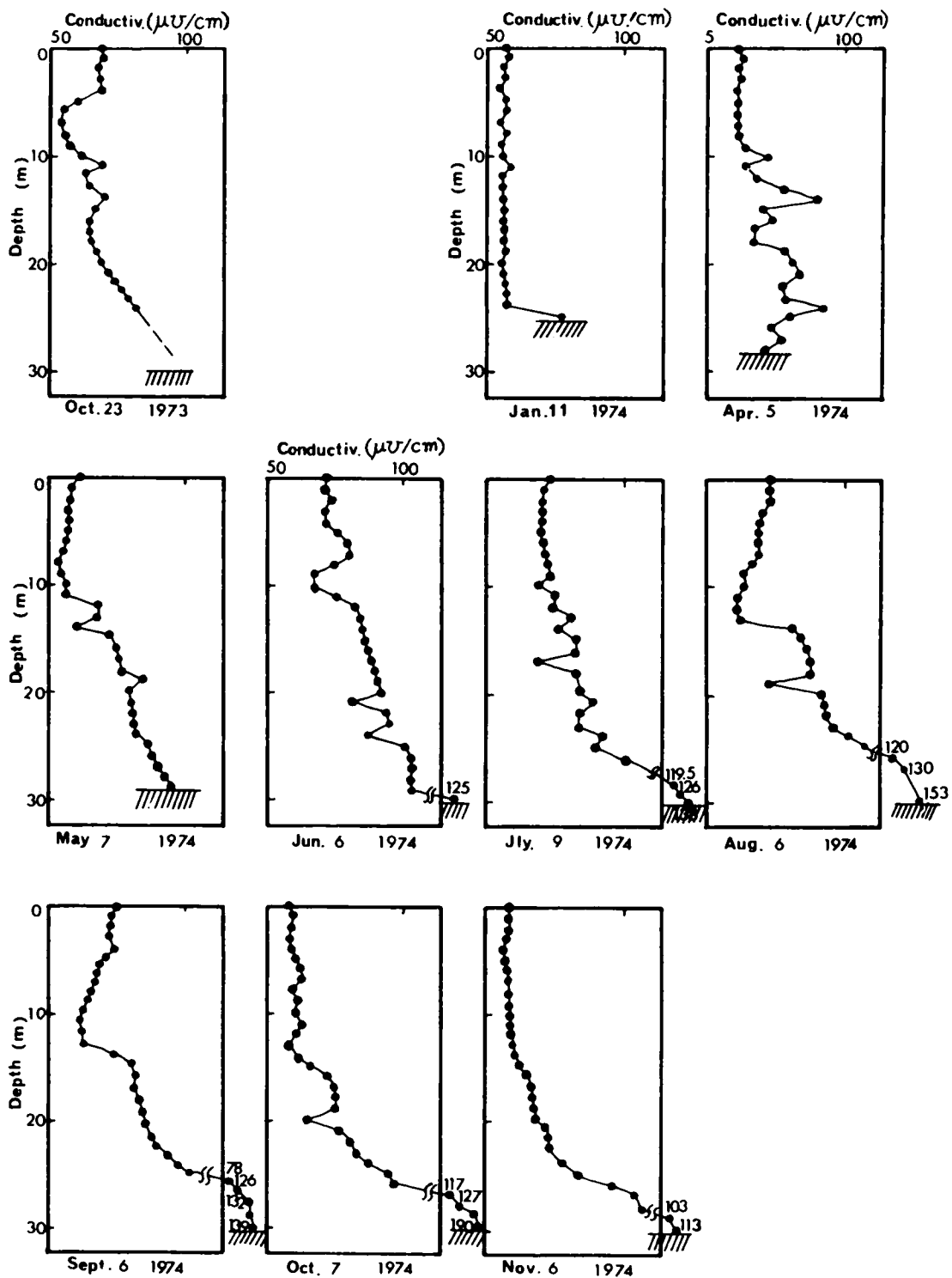
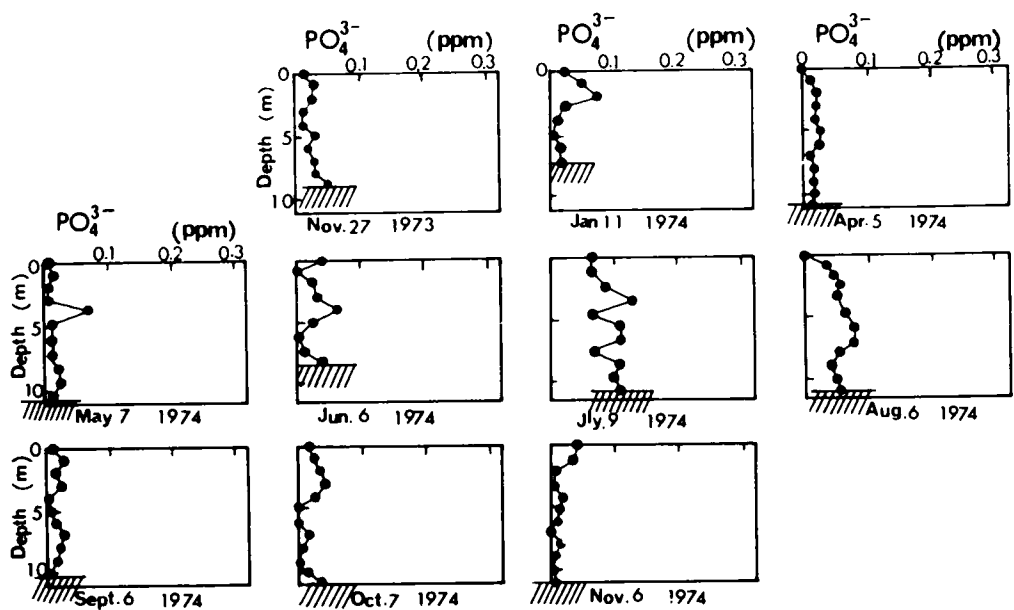
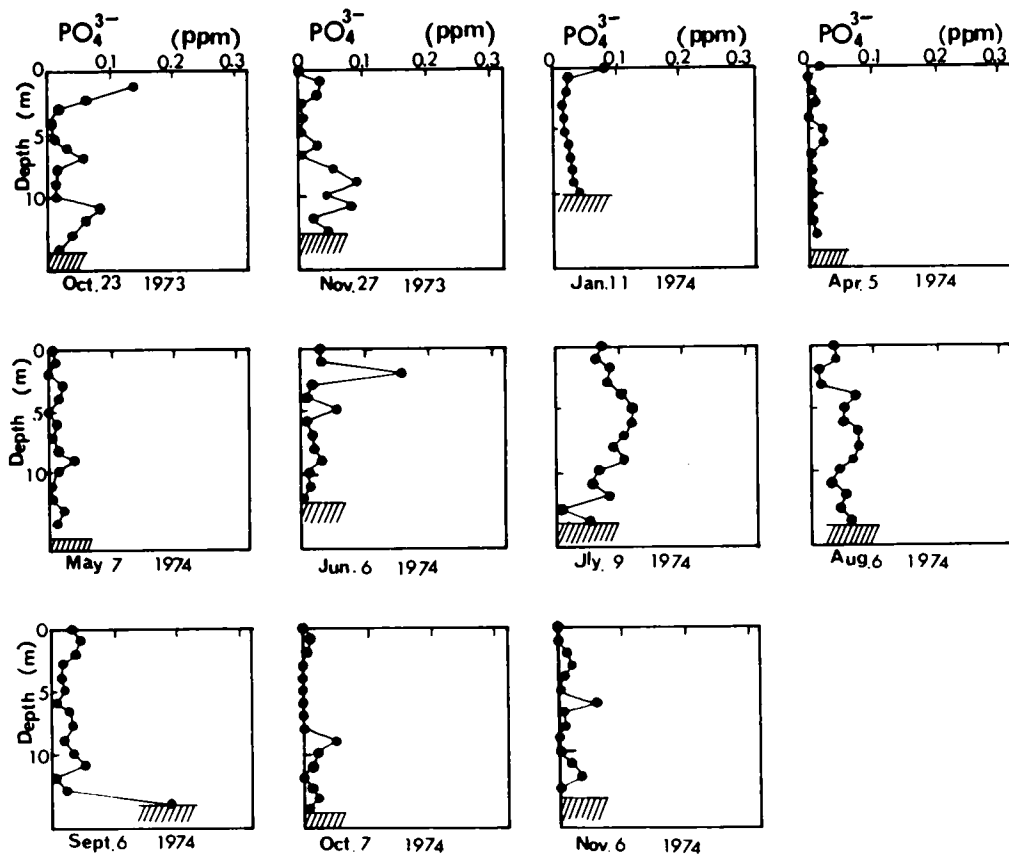


図3-8 (d)導電率の鉛直分布(取水塔前地点)



(a) Nagase



(b) Gunkai

図 3-9 (a), (b) PO_4^{3-} の鉛直分布 (長瀬, 郡界地点)

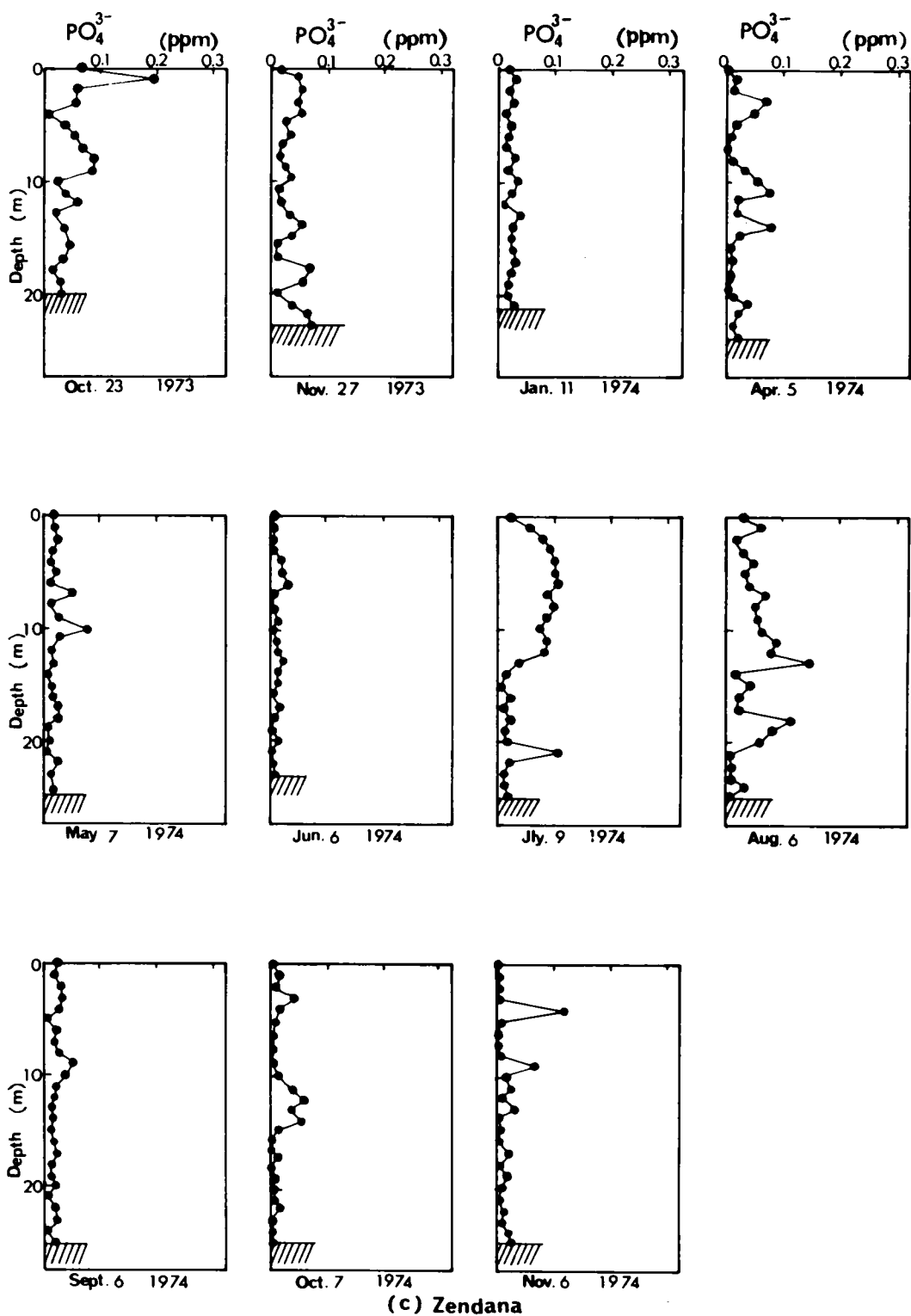


図 3-9 (c) PO_4^{3-} の鉛直分布 (膳棚地点)

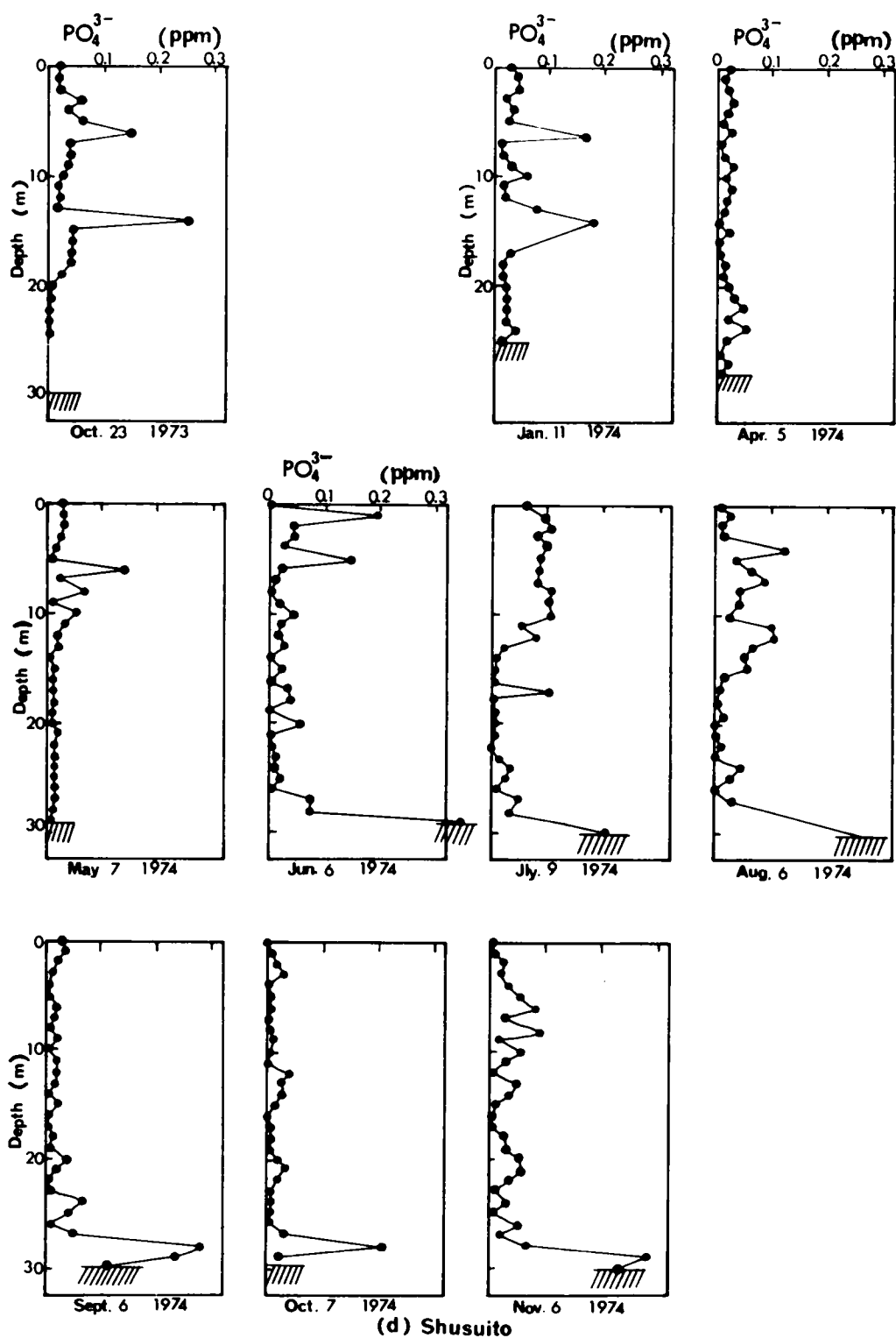
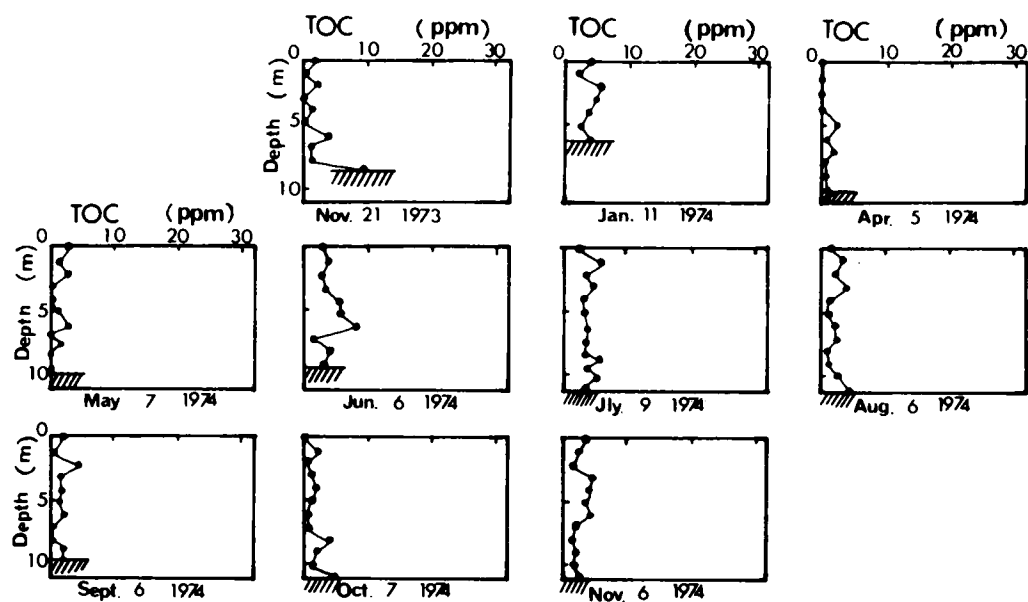
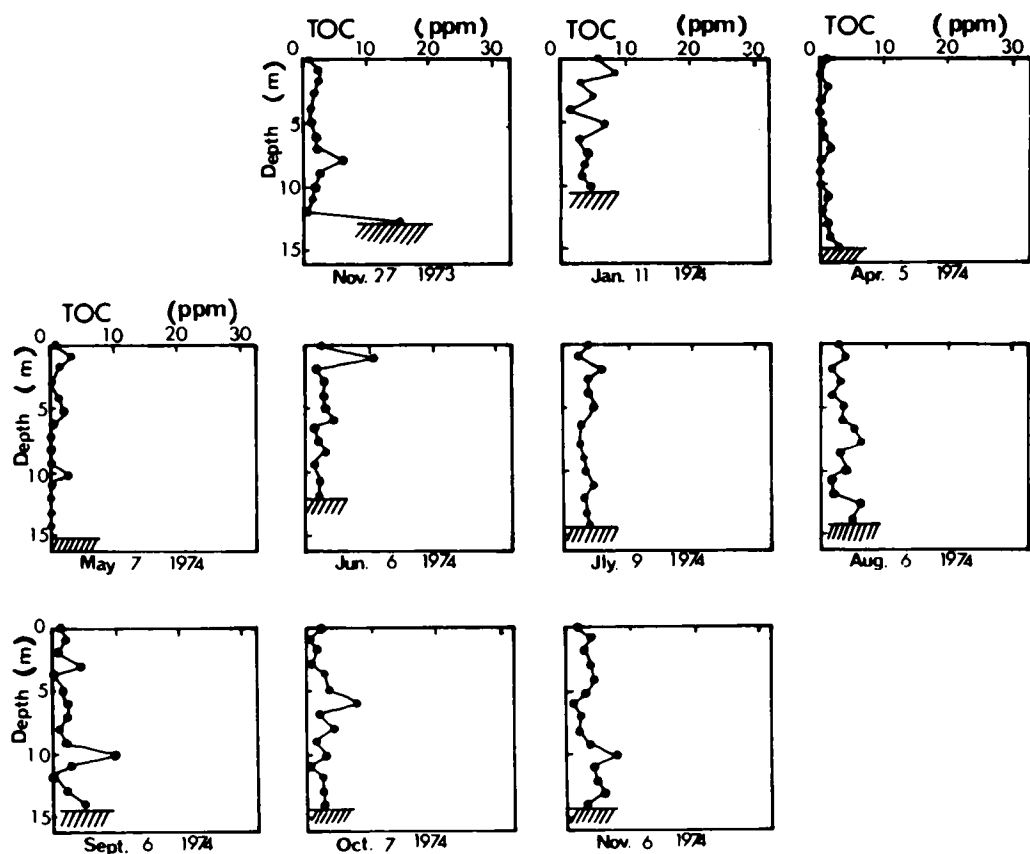


図 3 - 9 (d) PO_4^{3-} の鉛直分布 (取水塔前地点)



(a) Nagase



(b) Gunkai

図3-10 (a), (b) TOC の鉛直分布 (長瀬, 郡界地点)

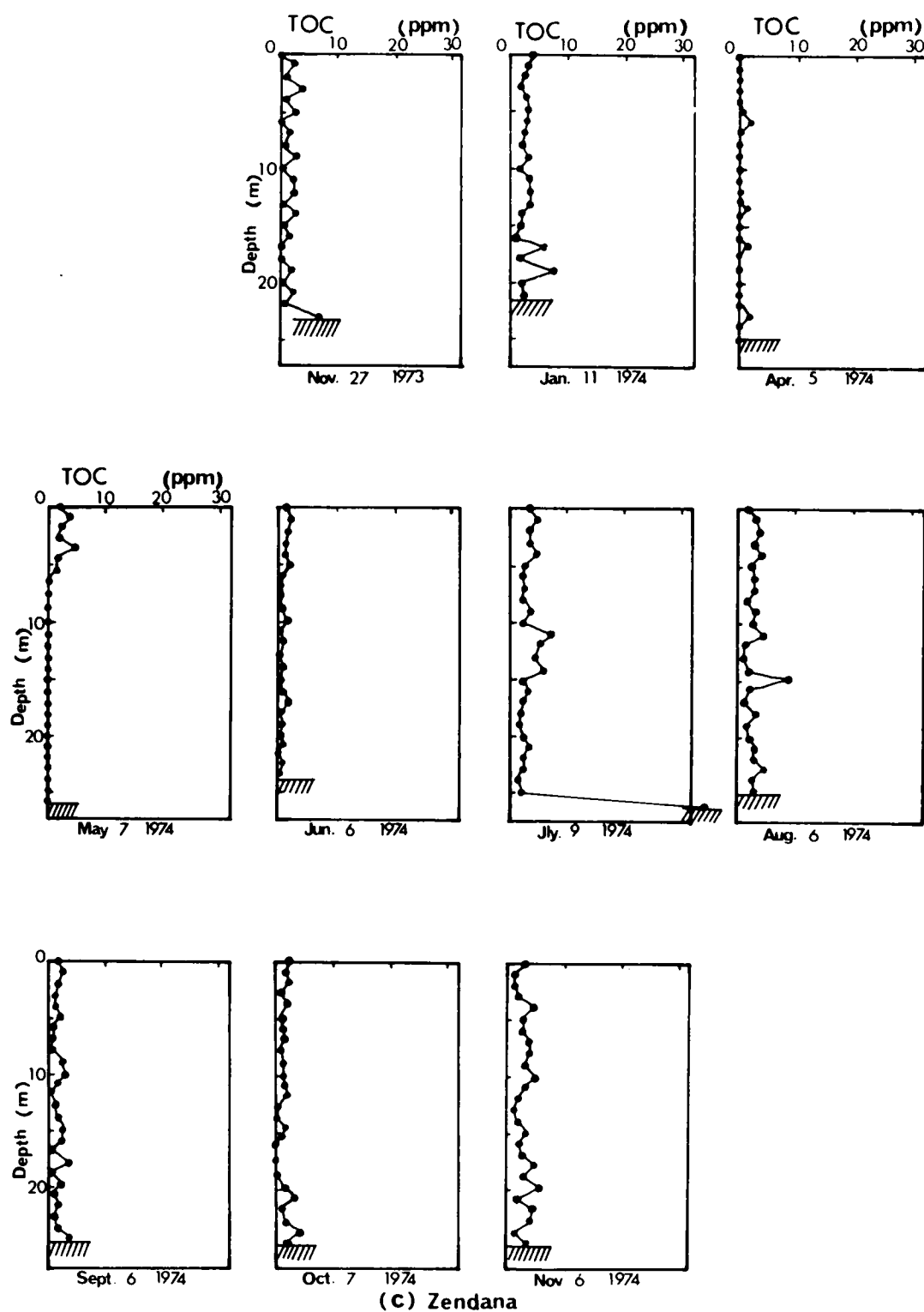


図3-10 (c) TOC の鉛直分布 (膳棚地点)

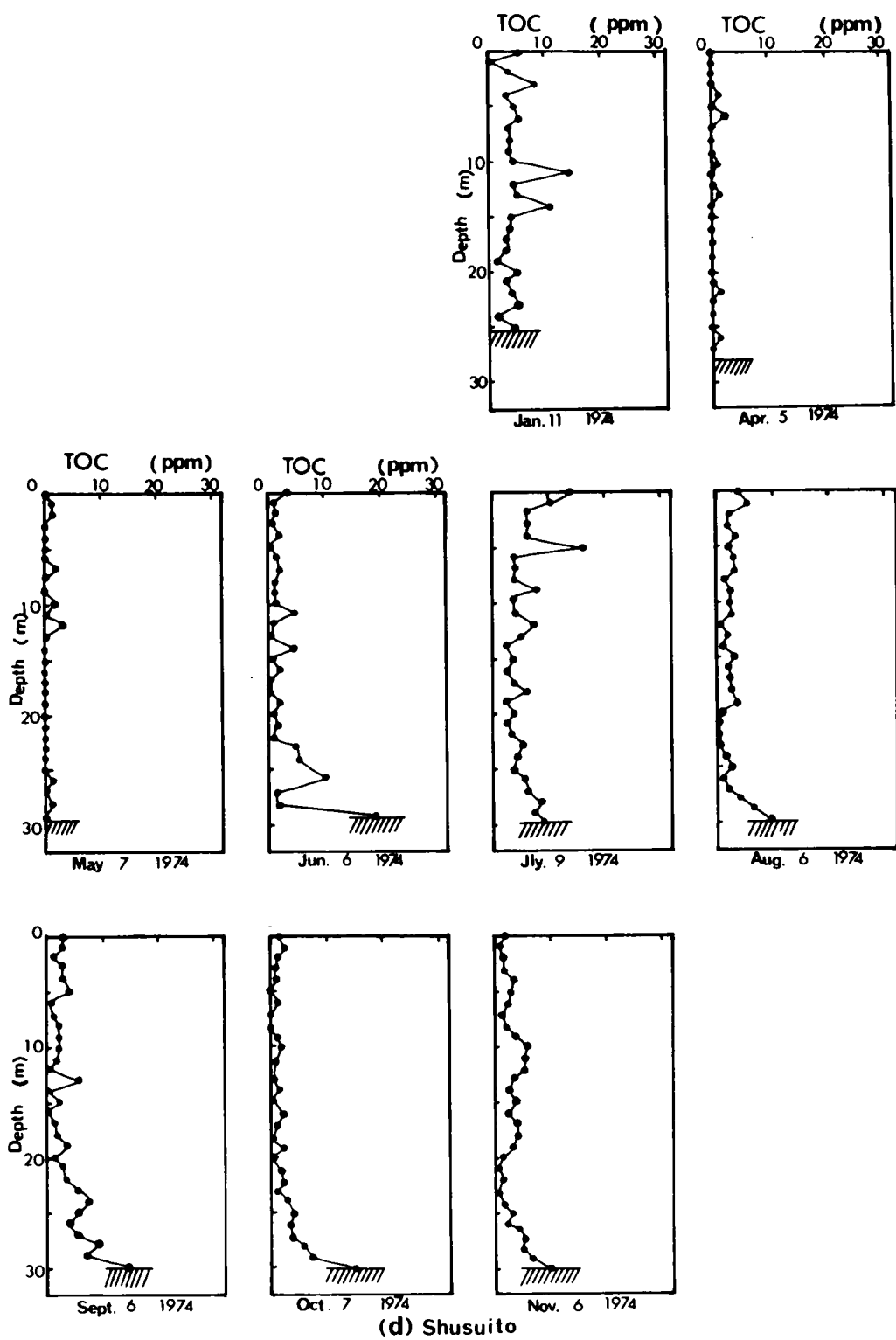


図 3 - 10 (d) TOC の鉛直分布 (取水塔前地点)

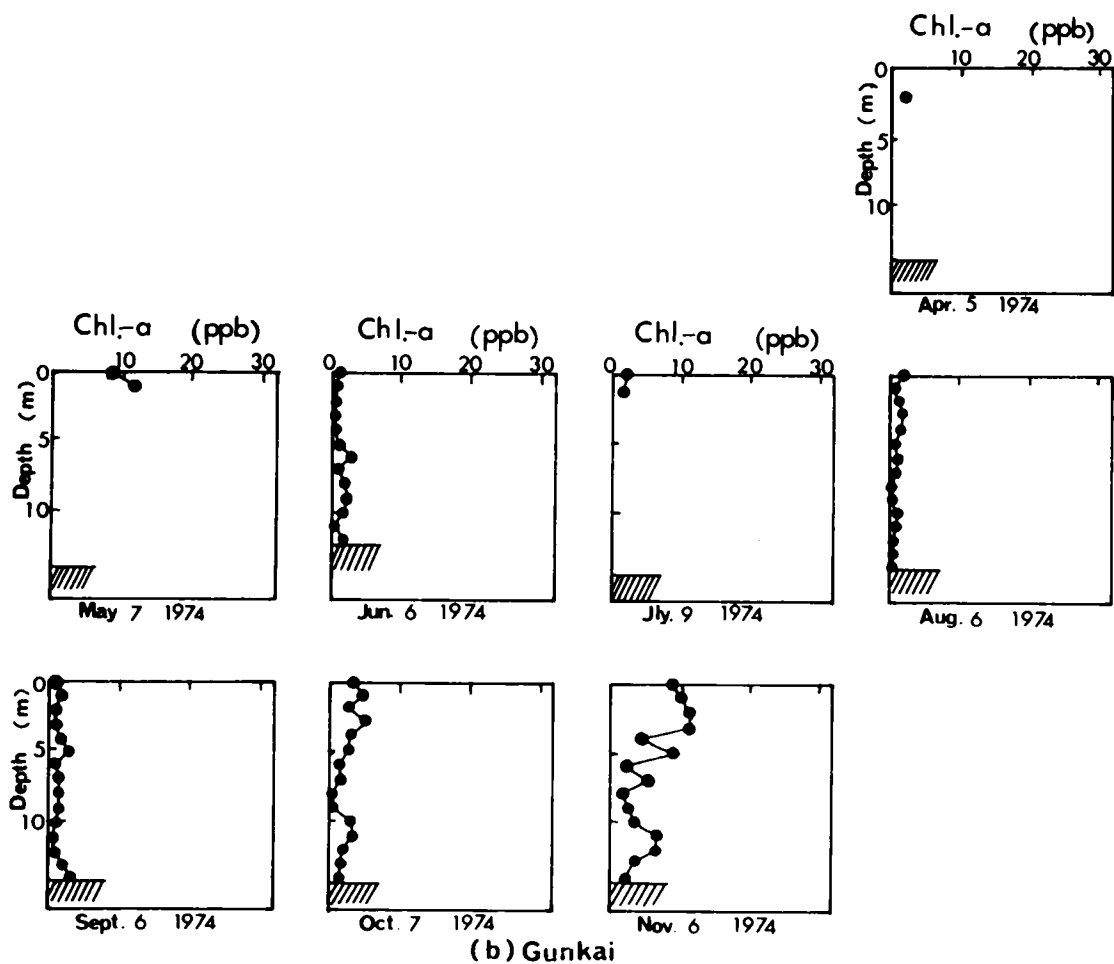
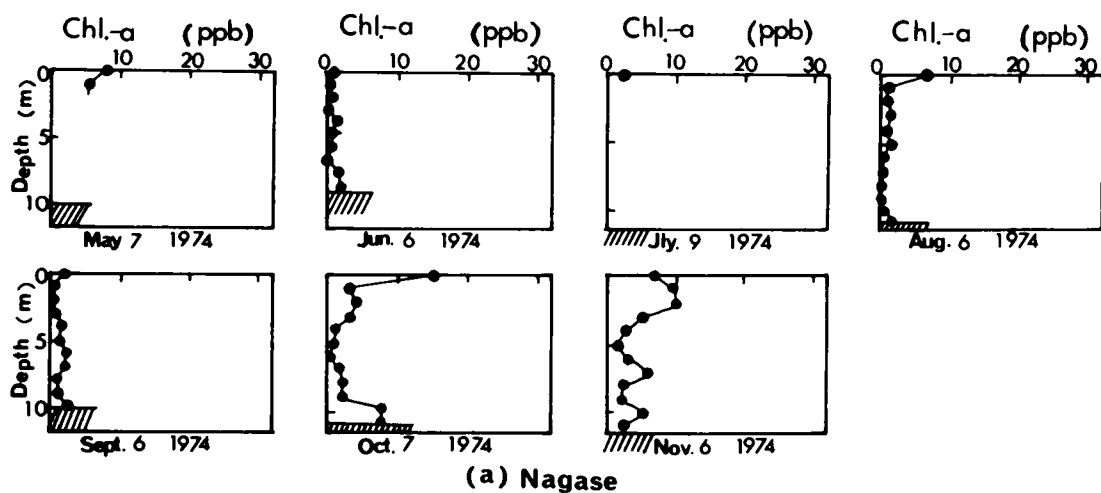


図 3-11 (a), (b) クロロフィル a の鉛直分布 (長瀬, 郡界地点)

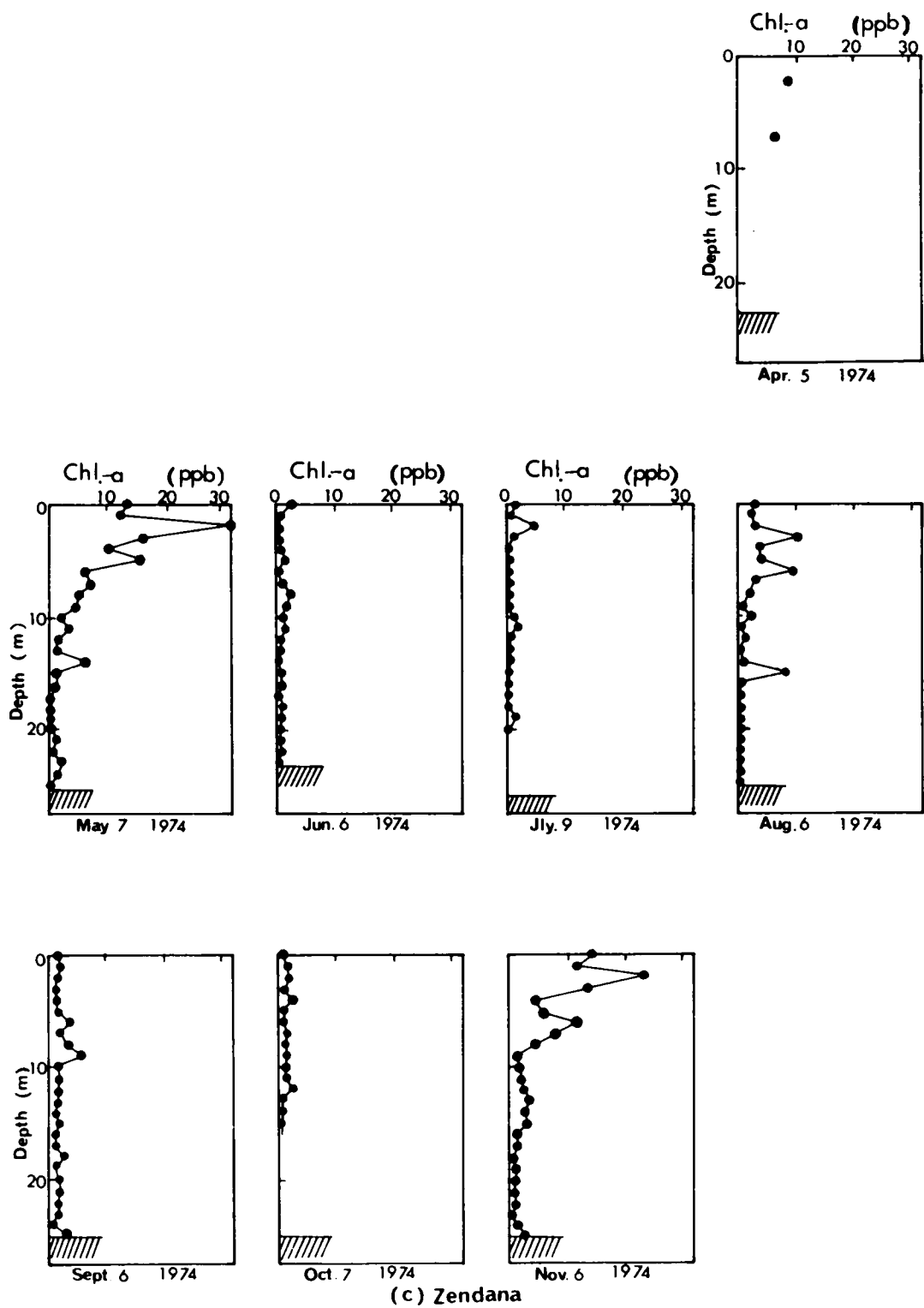


図 3 - 11 (c)クロロフィル a の鉛直分布 (膳棚地点)

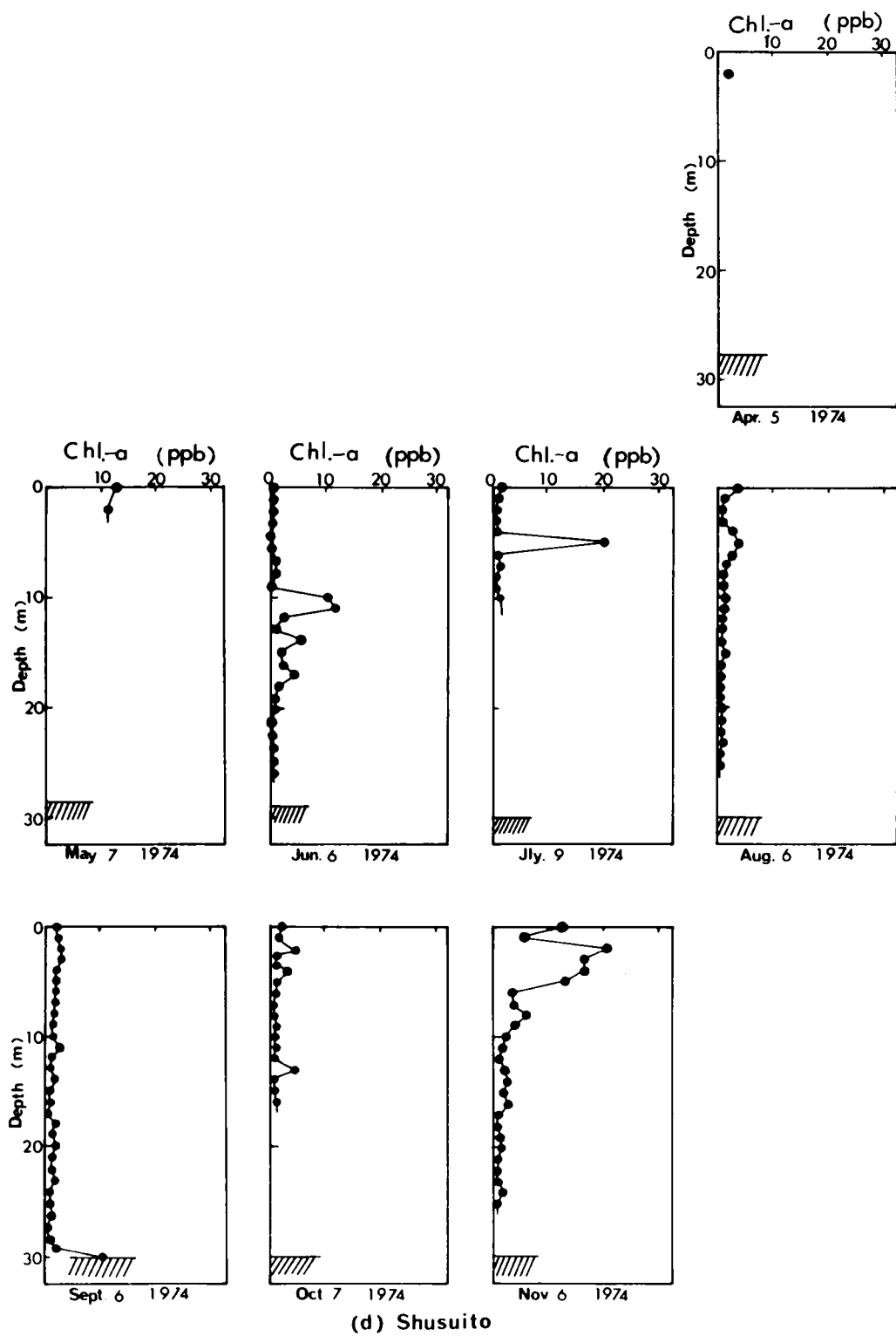


図 3 - 11 (d)クロロフィル a の鉛直分布 (取水塔前地点)

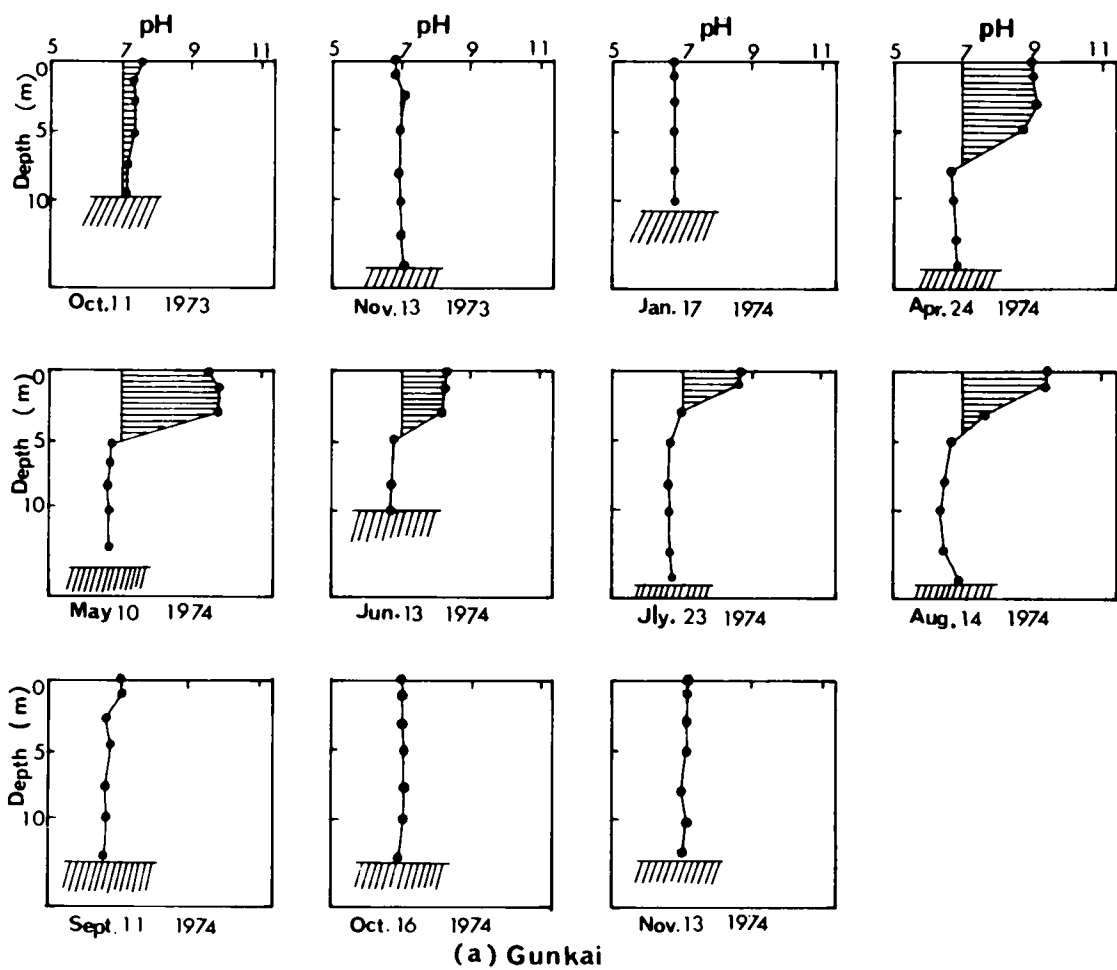


図 3 - 12 (a)pH の鉛直分布 (郡界地点)

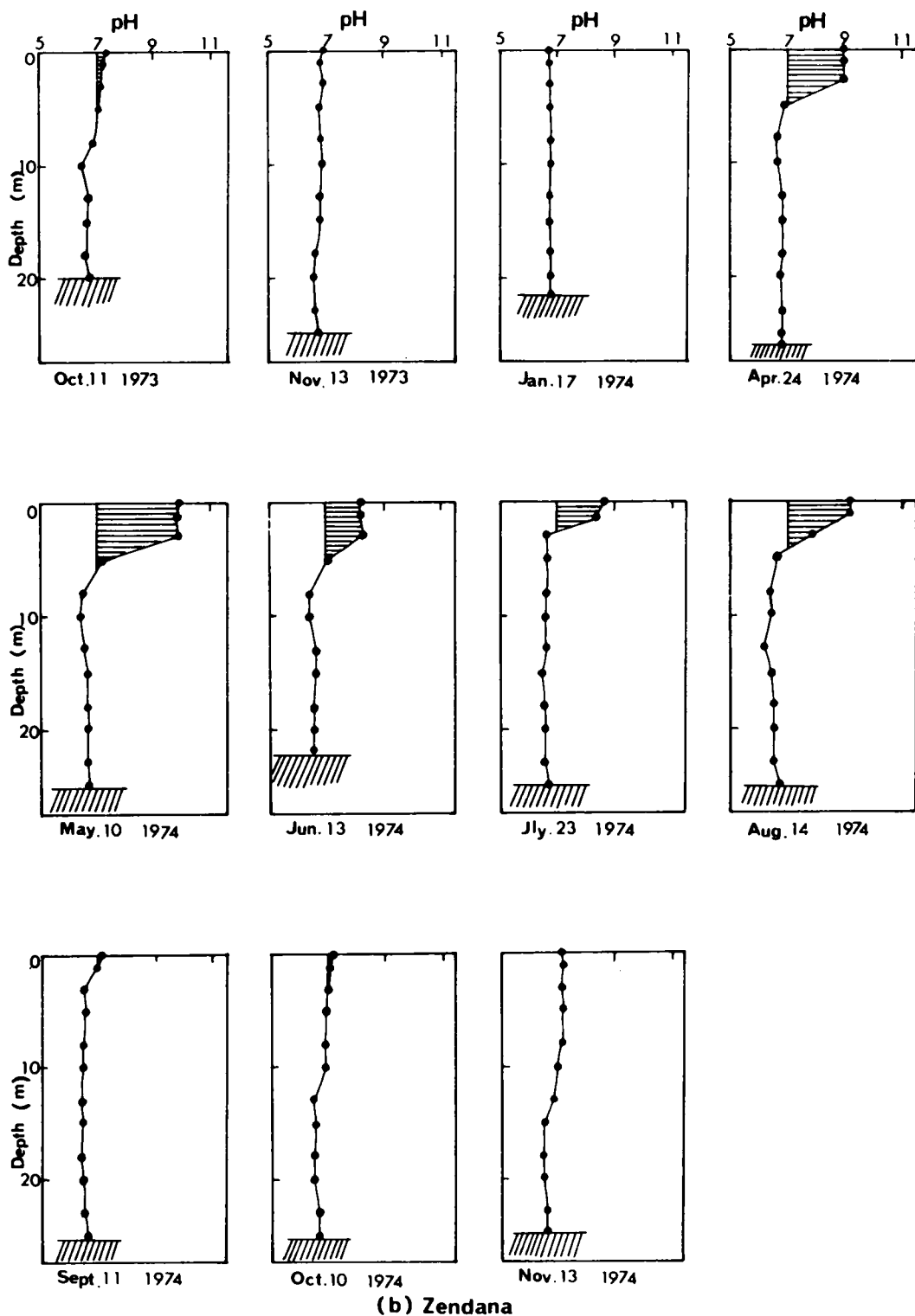


図 3 - 12 (b)pHの鉛直分布 (膳棚地点)

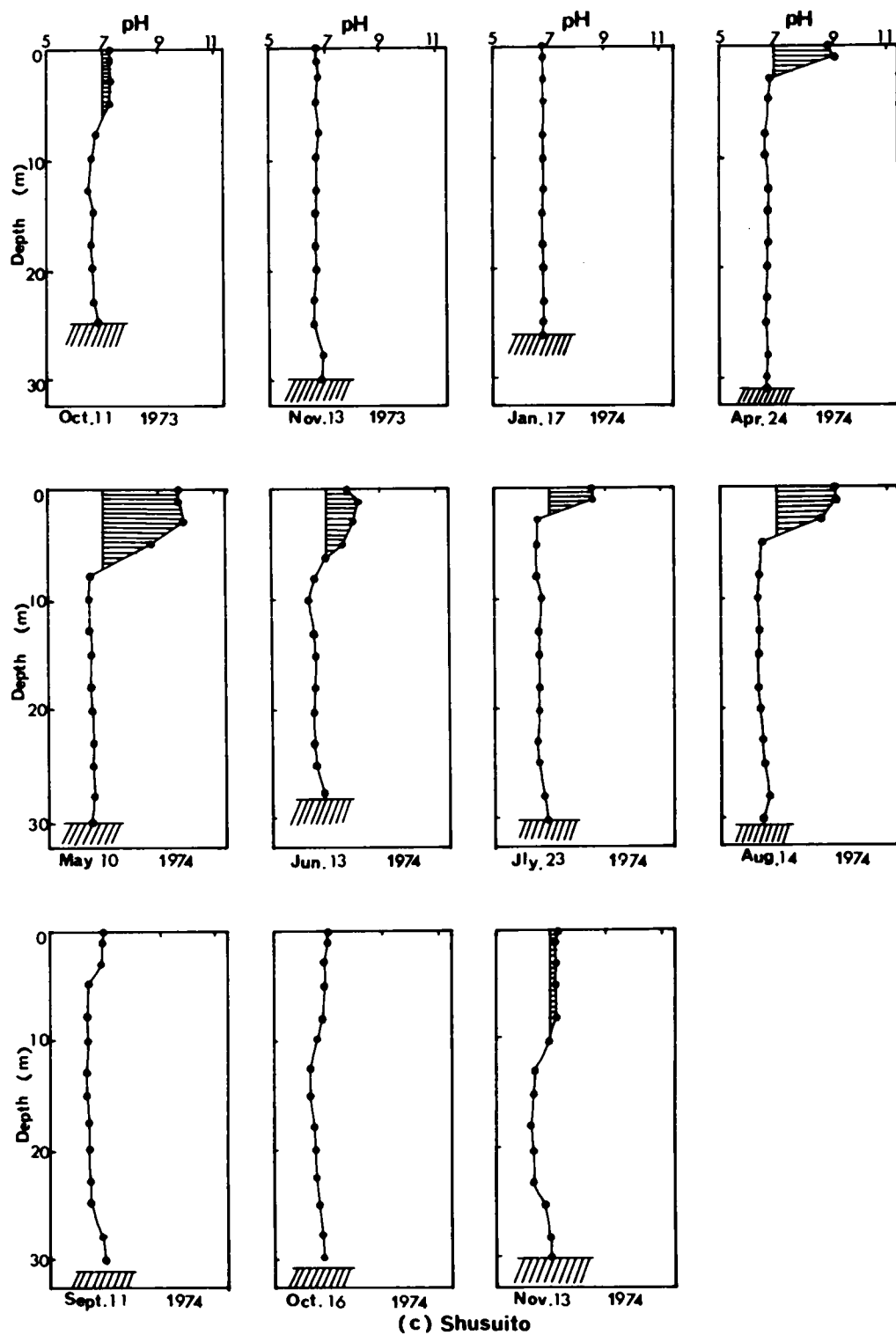


図 3 - 12 (c)pHの鉛直分布 (取水塔前地点)

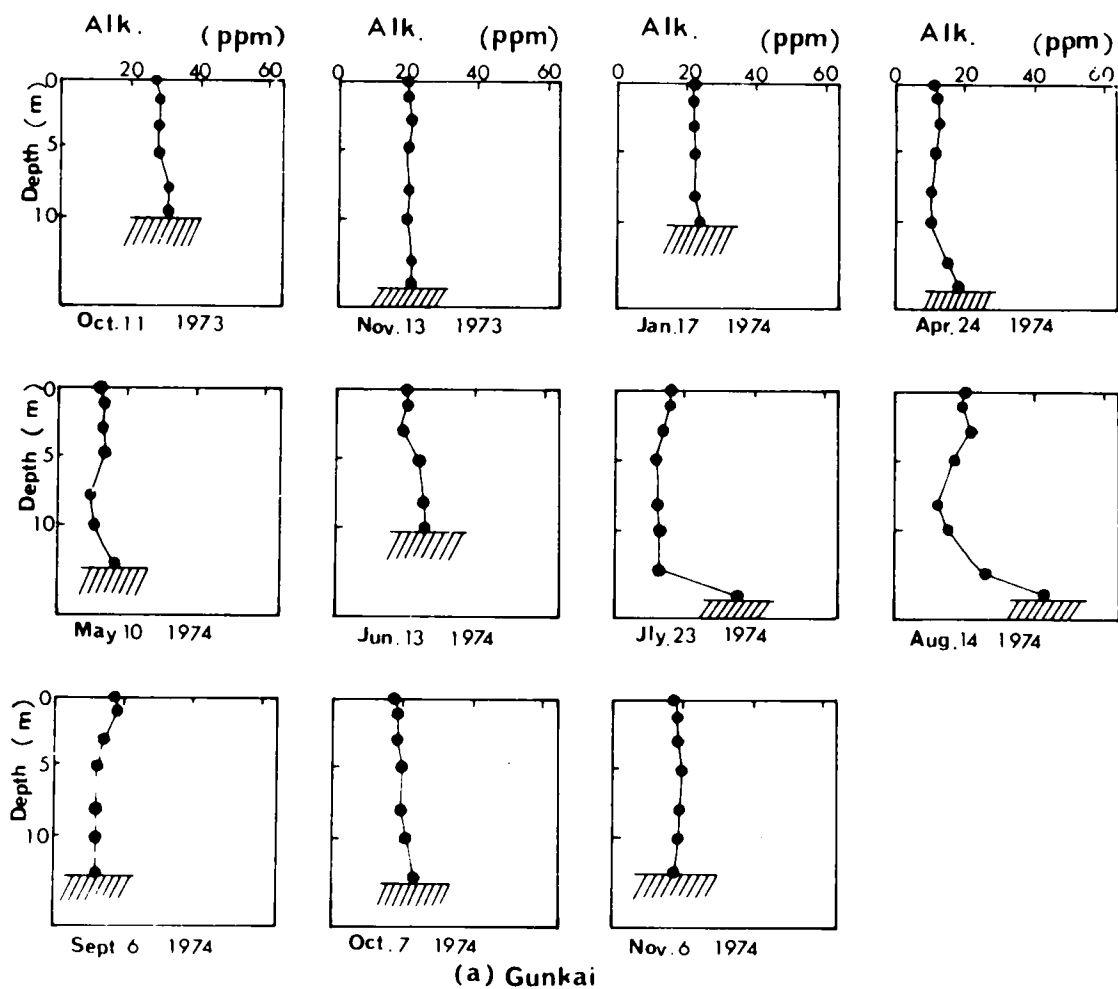


図 3-13 (a) アルカリ度の鉛直分布 (郡界地点)

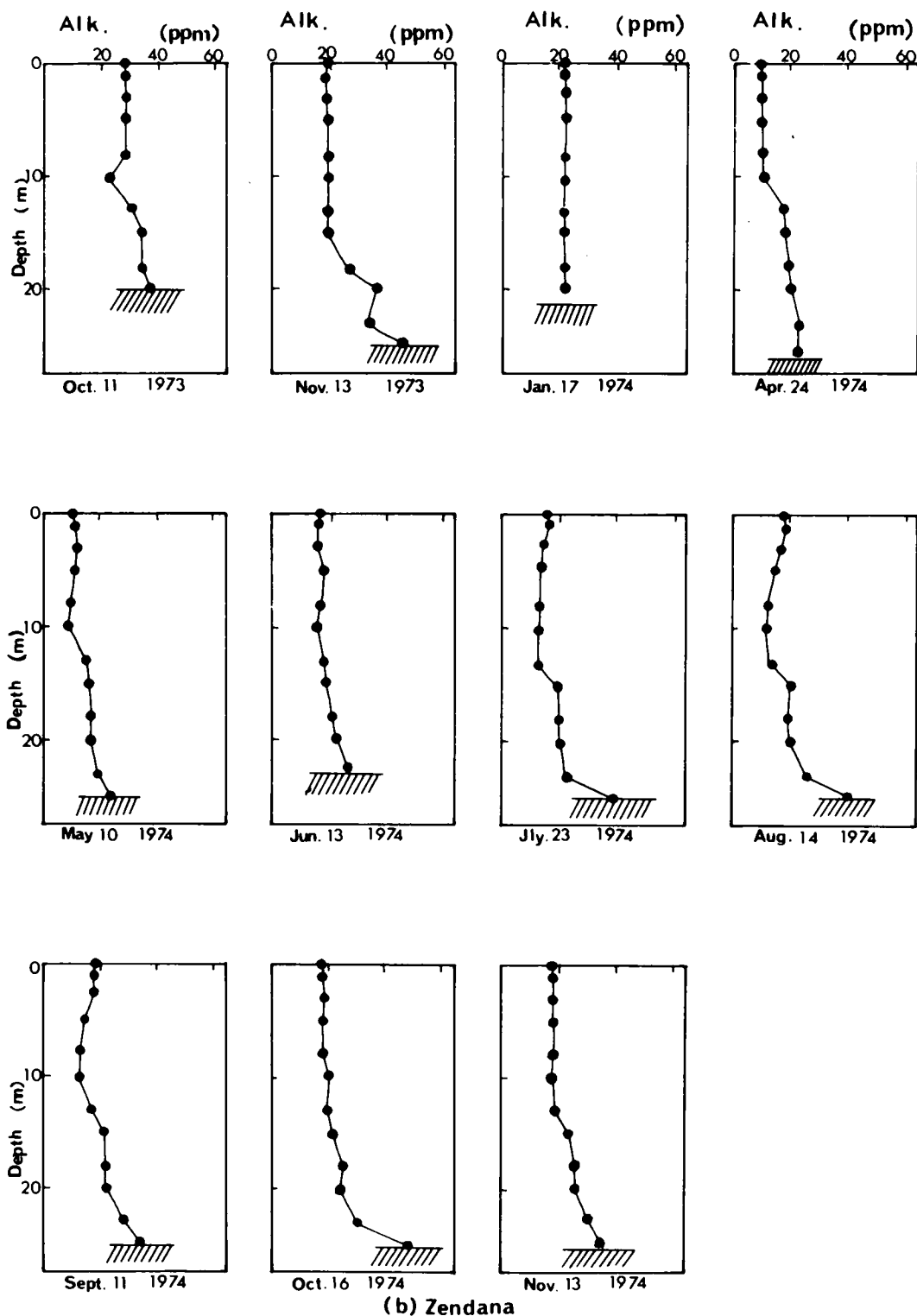


図3-13 (b)アルカリ度の鉛直分布(膳棚地点)

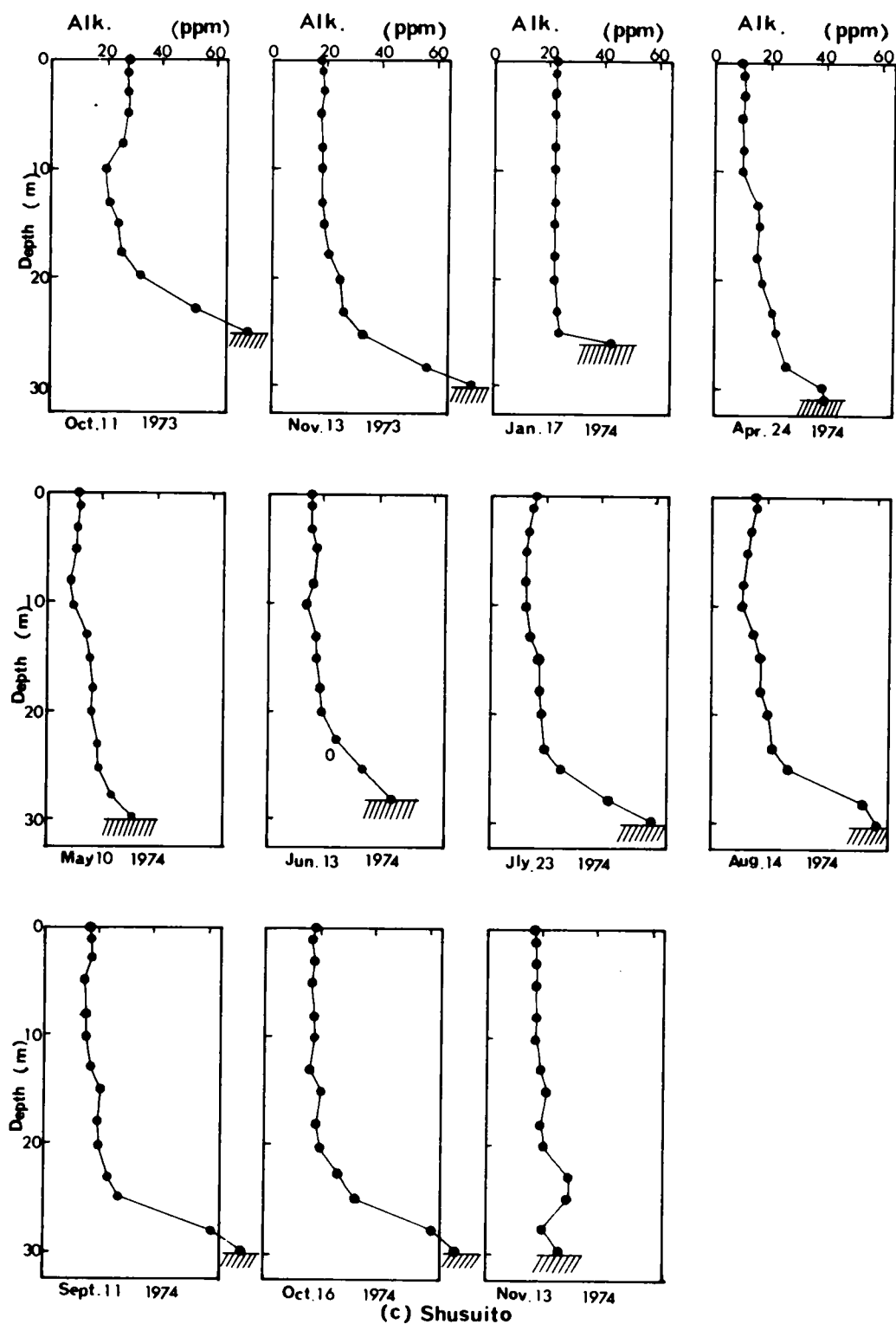


図 3-13 (c) アルカリ度の鉛直分布 (取水塔前地点)

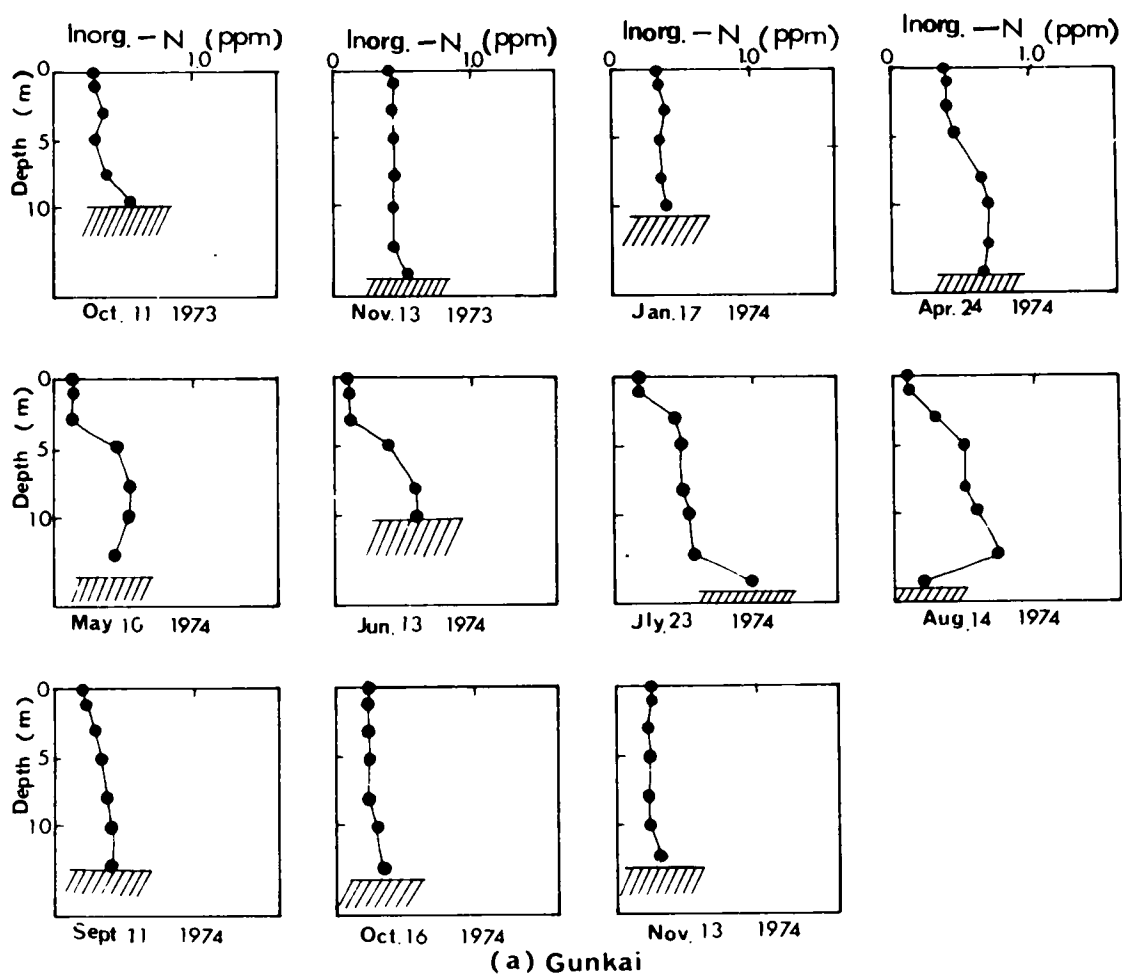
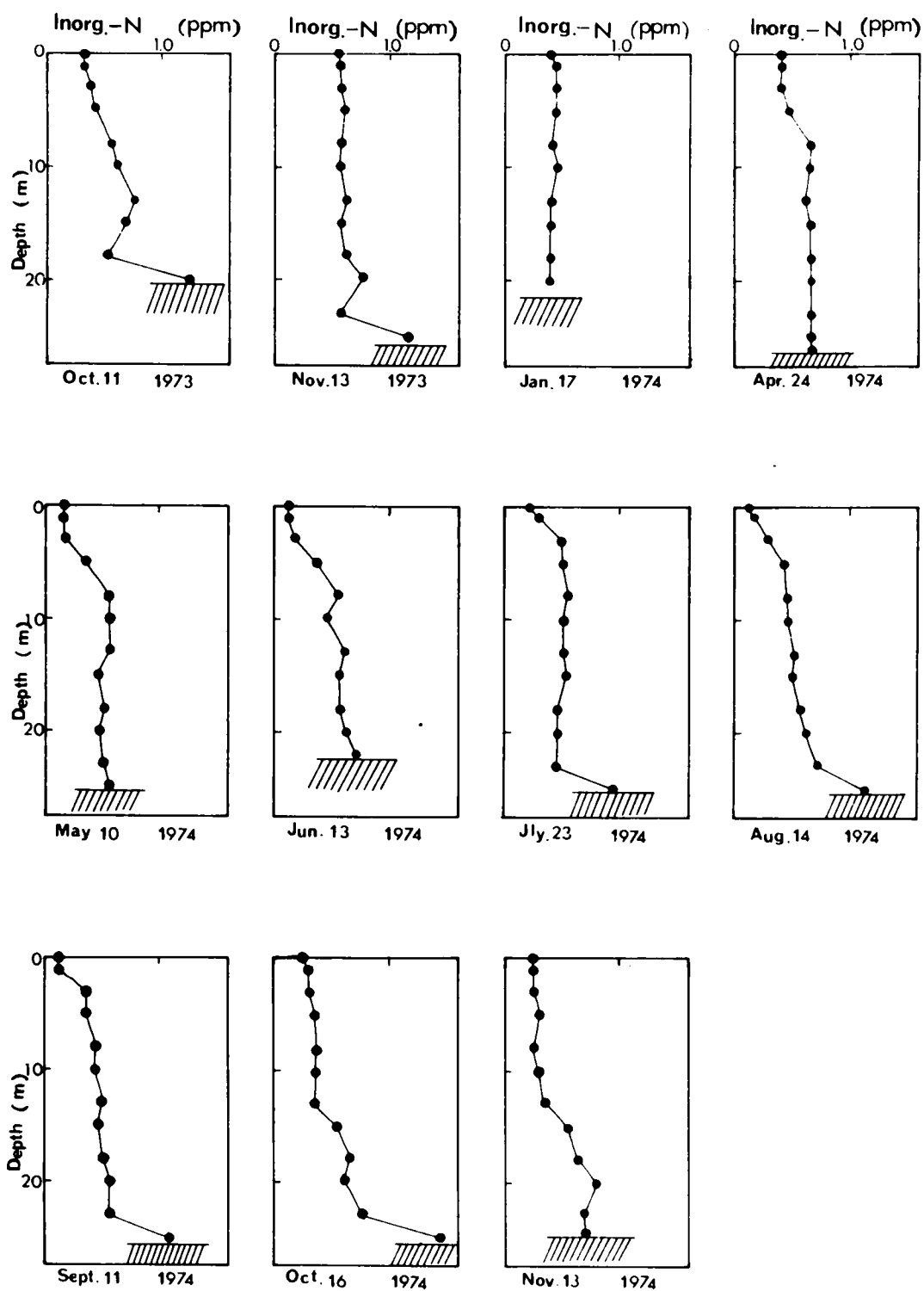


図 3 - 14 (a)無機態窒素の鉛直分布 (郡界地点)



(b) Zendana

図 3 - 14 (b)無機態窒素の鉛直分布 (膳棚地点)

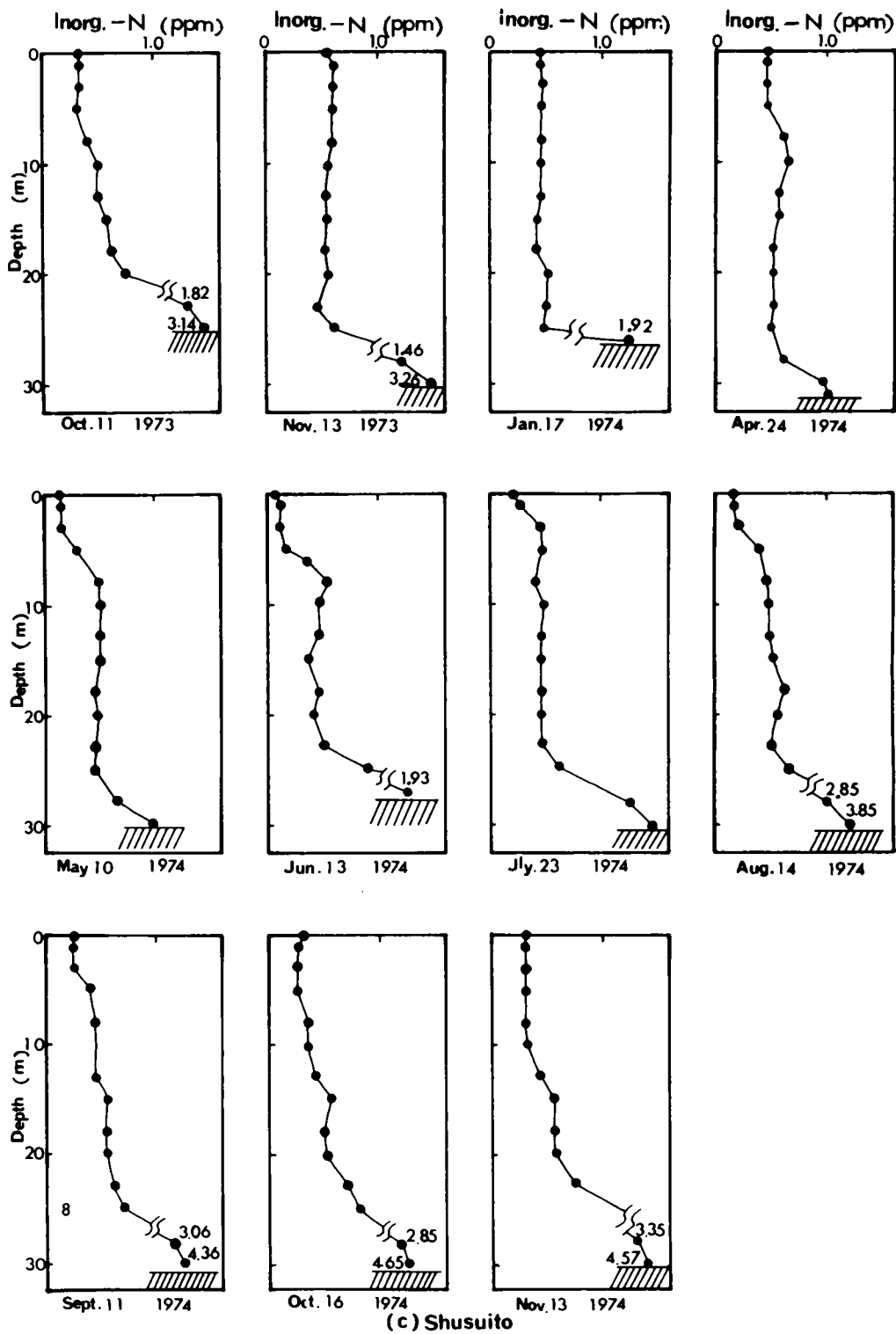


図3-14 (c)無機態窒素の鉛直分布(取水塔前地点)

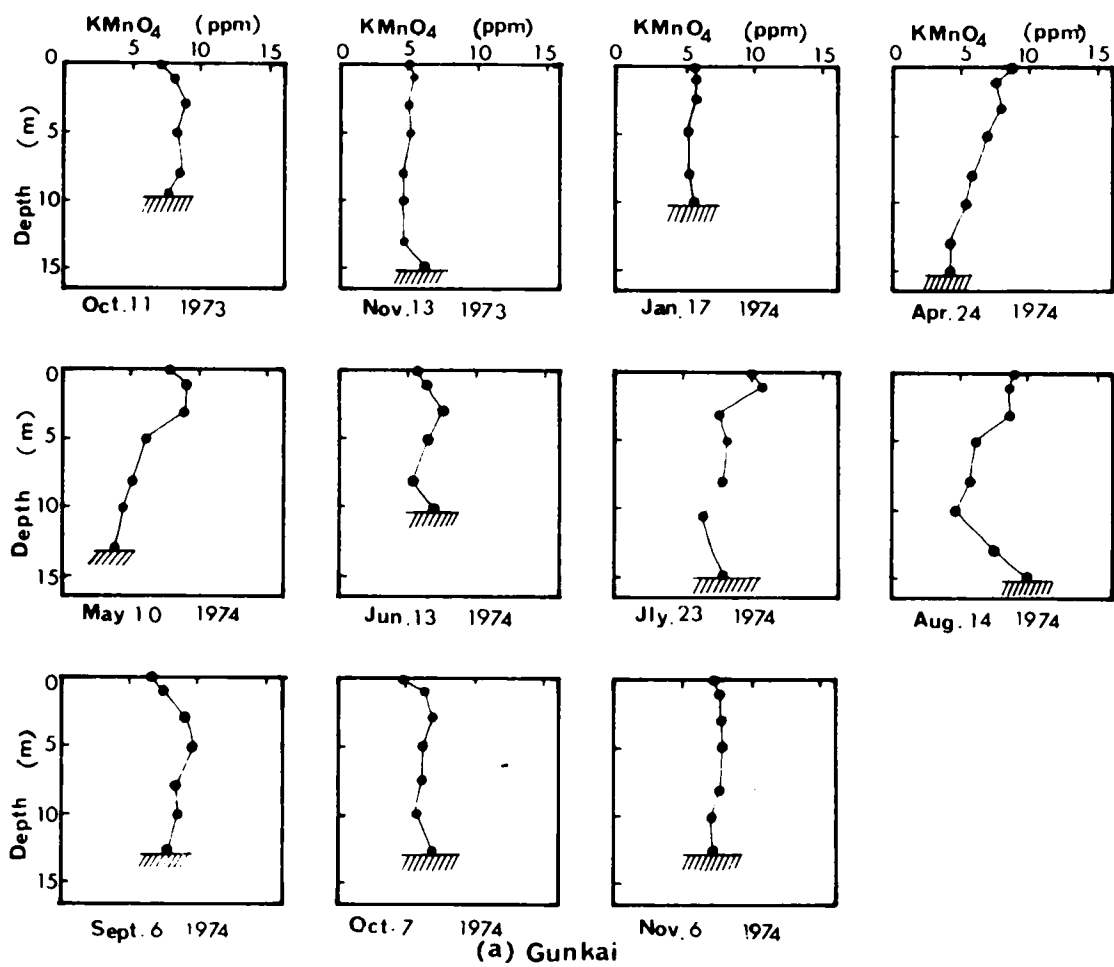


図 3 - 15 (a) KMnO_4 消費量の鉛直分布 (郡界地点)

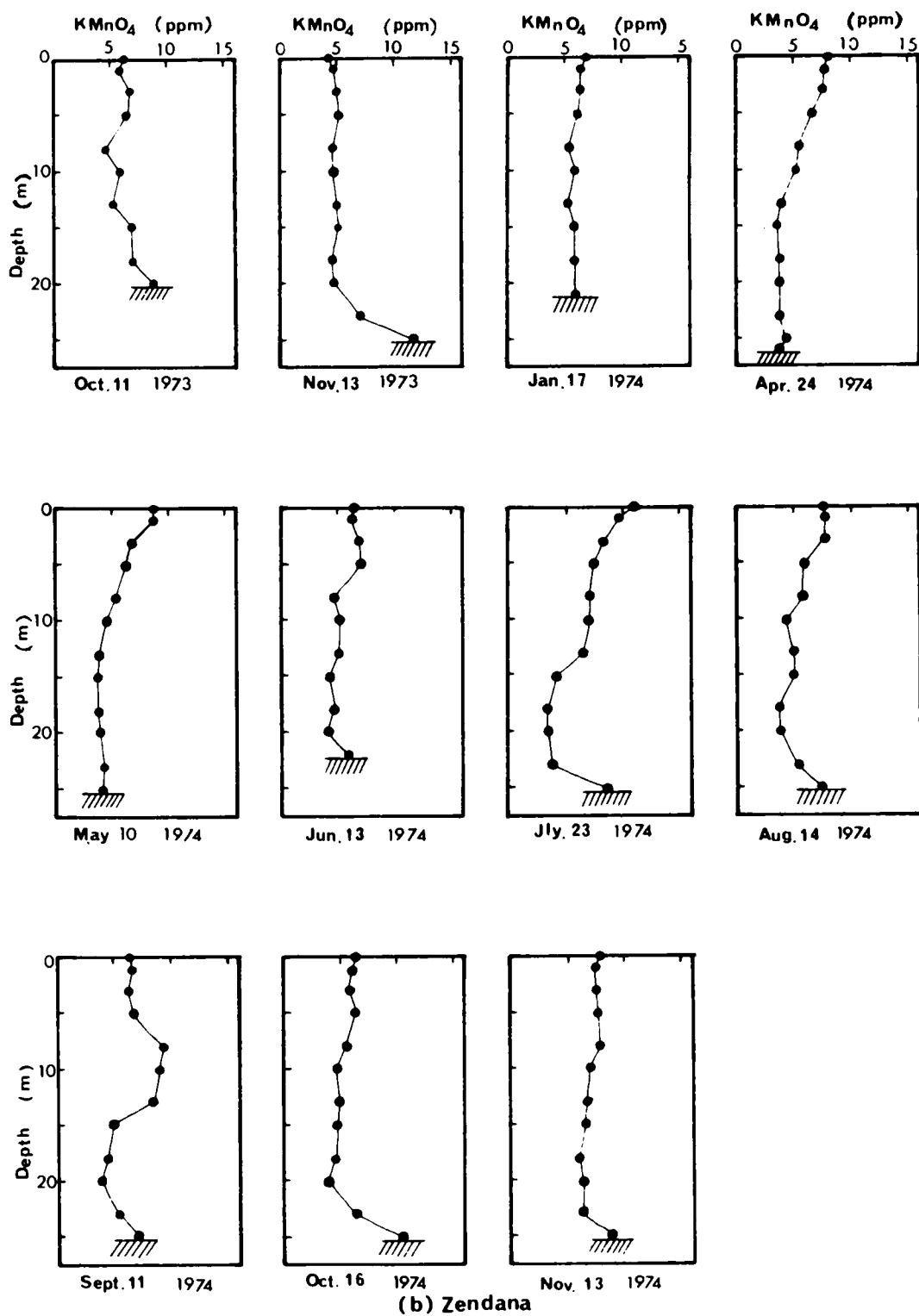


図3-15 (b) KMnO_4 消費量の鉛直分布 (膳棚地点)

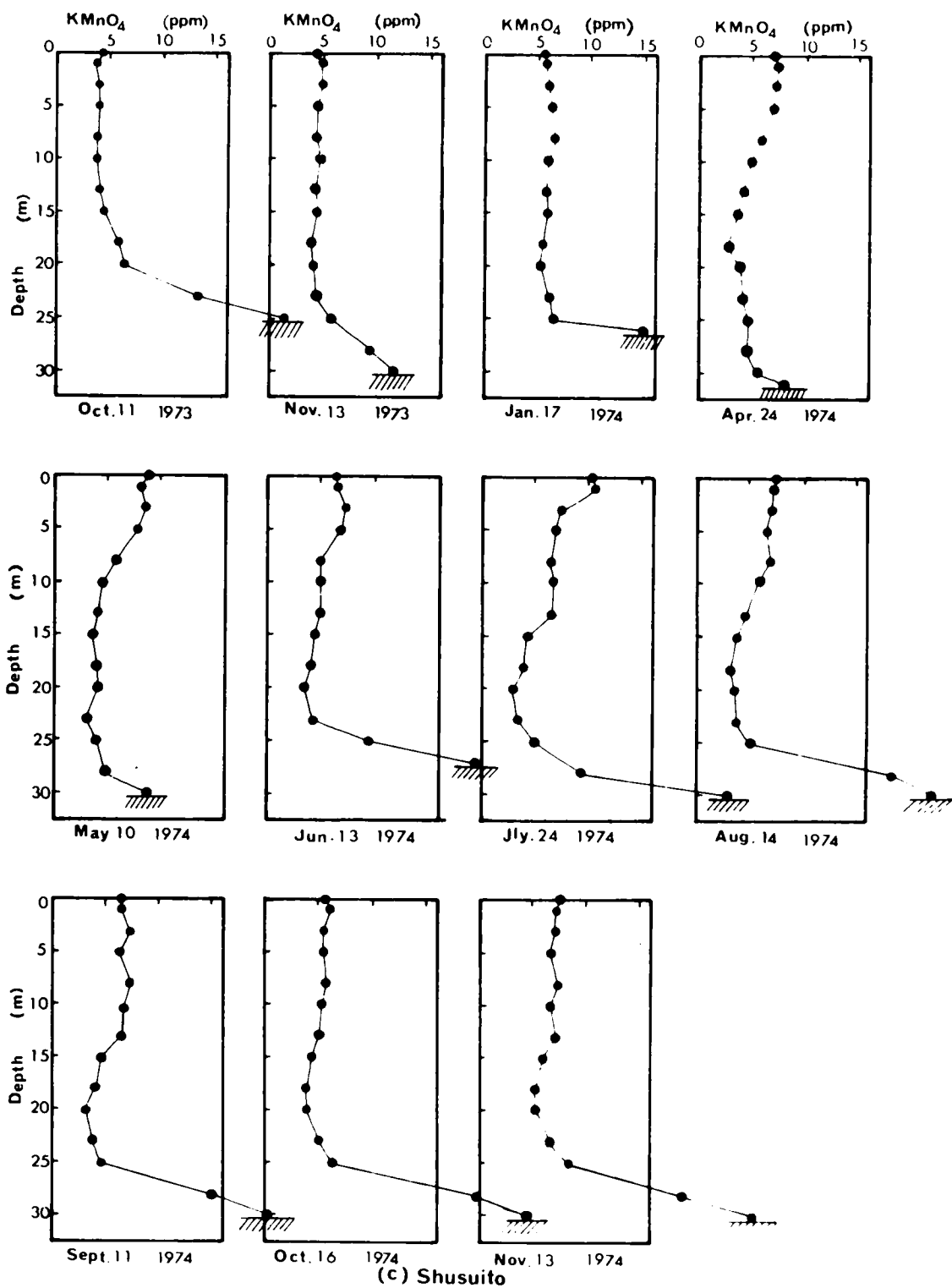


図3-15 (c) KMnO_4 消費量の鉛直分布 (取水塔前地点)

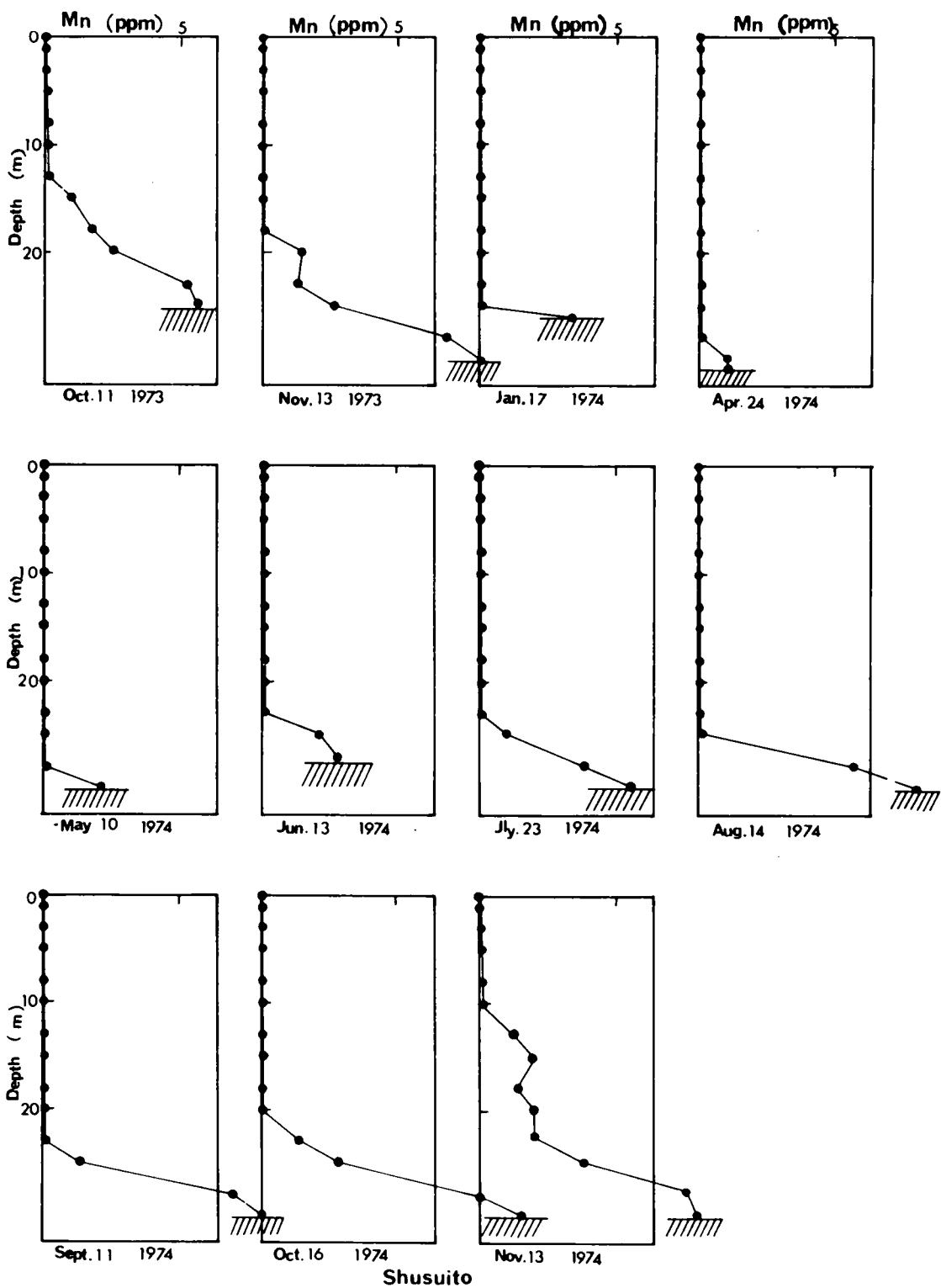


図 3 - 16 全 Mn の鉛直分布 (取水塔前地点)

の残存により、溶存酸素濃度は深水層では2 ppm以下で涸渇状態に近い。 PO_4^{3-} 濃度も出水によって表水層では全般的に大きい。

全体的には表水層下部の温度躍層に近い部分は、流入水がもたらす影響によって、表水層上部の貯留水的な性質とは異質な様相を呈している。今回は、試料水量と時間の関係から TOC の測定はできなかった。

第2回（昭和48年11月27日）観測結果

この時期は11月下旬で循環期初期にあたり、水表面と底面での水温差は約3.5℃程度で、全水深にわたってほぼ様な水温分布となっている（図3-4参照）。しかし、23 mの水深を有する膳棚地点では20 m以深においては前回と同様に溶存酸素が3 ppm未満で依然として不足した状態が持続されている（図3-5参照）。その他の水質項目では、20 m以深での導電率が大きくなる他は、ほぼ様な水質の鉛直分布を示している。底面付近では溶存酸素の不足により堆積物や底泥から電解質が溶出していると思われる。今回は、取水塔前の採水が時間的にできなかった。

第3回（昭和49年1月11日）観測結果

この時期は雪もまじる厳寒の冬季循環期であり、水温はもちろん他の水質も底面付近を除きほぼ様な鉛直分布を呈している。TOCは前回に比べて大きな値になっていることが注目される。また、溶存酸素は深水層までかなり回復してこの後、また減少に向かうのである。底面付近には、その水深に伴なう特異性と、成層期からの影響が残っており、電気伝導度、SS、濁度は高いままである。

第4回（昭和49年4月5日）観測結果

この時期は春季循環期から春季停滞期への遷移期にあたり、水深5～6 mと水深12 m付近に弱い躍層が出現している（図3-4参照）。この水温分布と同様の分布形状をとるのは溶存酸素濃度である。また、栄養塩として PO_4^{3-} 濃度は、全般的に前回および前々回に比べて表水層では少くなっている。その結果、今回より測定に加えたクロロフィルa濃度は水深0～5 m、6～10 mのコンポジット試料では、水温の上昇、光量の増加および栄養塩濃度の補給状態によって、膳棚地点では大きい値を示している。

第5回（昭和49年5月7日）観測結果

この時期には、すでに春季停滞期に入っており、水深4～5 mおよび10～13 mに温度躍層が存在する。この水温の鉛直分布に従って、溶存酸素飽和度の鉛直分布も、水深0～5 mでは120～140%と過飽和を呈し、5～10 mでは70～90%程度であり、水深15 m以下の深水層では、ほぼ75%以下となる。そして導電率は水深0～5 mで少し大きい値を示し、その下の水深6～10 mは低くて流動水塊の流動層と考えられる。また、SSは水深0～5 mで6～9 ppm と高く、水深6～7 mの躍層部で低く、水深8～13 mでは3～5 ppm とまた高くなる。水深0～5 mにおける高いSS量の原因は藻類が中心であり、試料水をろ過後のSSフィルターが緑かつ色を呈色することからも明らかである。また、これを裏付ける水質因子として、クロロフィルa濃度は水深0～5 mでは $10 \mu\text{g}/\ell$ 以上が多い。この値はかなり高い濃度であり、その後の神戸市水道局の調査による植物プランクトン濃度の鉛直分布とよく符合する。また、水深0～5 mではTOC濃度が他の水深に比べて大きいことも上記の理由から明らかとなる。

第6回（昭和49年6月6日）観測結果

この時期は夏季成層期に入っており、水深6～12 mにかなり強い温度躍層が1つ存在し、この温度躍層部、すなわち、変水層をはさんで、表水層と深水層とにはっきりと分けられる安定な成層状態を呈している（図3-4参照）。そして表水層では溶存酸素は過飽和であり、導電率も他の層に比べて大きい値を示している。膳棚地点の表水層では PO_4^{3-} 濃度は非常に小さな値になっている。また、温度躍層部では、電気伝導度が水深8～11 mだけ極端に低くなっており、水質的に異なる水塊、すなわち流入水の取水口への流動層と考えられる。この層では蛍光度およびクロロフィルa量の値が大きい。深水層では、溶存酸素が他からの補給がなく前回より減少しており、底面付近の極端な値以外は、この層では水質分布が一様に近い。

第7回（昭和49年7月9日）観測結果

この時期は梅雨期にあたり、観測当日は晴天であったが、一般に気候的な原因により生物の生産活動もさほど活発ではない。温度躍層は前回より少し降下し、水深12～16 mに存在し、その強度を増して躍層の厚さは減少している。したがって表水層と深水層に二分されたような形になっているが、表水層の上部の水深2～5 mに弱い躍層が出現している（図3-4参照）。溶存酸素は表水層全体で飽和に近く、深水層上部では50～60%の飽和度ではほぼ同様であるが、温度躍層の水深13～15 mでは20%前後の飽和度となって極端に小さく、深水層下部とともに相当な不足状態である。これは、生物の呼吸活動や分解に溶存酸素が使用され、補給されない状態が持続しているためと考えられる。 PO_4^{3-} は梅雨の出水による補給のために表水層ではかなりの量まで回復している。そして、表水層の水深3～6 m付近ではSS量および濁度がやや高い値を示している。

第8回（昭和49年8月6日）観測結果

この時期は盛夏にあたり、夏季成層期の頂点であり、水深12～16 mの主躍層に加えて、表面近くの3～8 mにも表面加熱と乱れによって温度躍層が存在し、表水層が二分された形になっている（図3-4参照）。図3-5からも明らかなように、溶存酸素は水深0～3 mの表水層上部では過飽和、表面近くの躍層および主躍層ではその上下に比べてかなり低い値であり、水体の混合および水質交換の小さいことを示している。そして深水層においては、溶存酸素がほぼゼロの水塊の厚さが増加している。

この観測日前後は、貯水池表水層にmicrocystisの大量発生による“水の華（water bloom）”が発生して、この翌日には硫酸銅散布も行なわれている。また、表水層下部および深水層上部ではSSおよび濁度が少し大きな値を示している。また、microcystisの群集（コロニー）は採水器には入りにくく、クロロフィルa量としては、あまり大きな値にはならなかった。

第9回（昭和49年9月6日）観測結果

この時期は夏季停滞（成層）期の終りに近く、水深13～17 mの主躍層は前回より1 mほど降下しただけで依然として強力であるが、表面近くの水深3～7 mの温度躍層は弱まり、やがて降下して主躍層に包含されてしまうことになる。溶存酸素は水深0～3 mでは過飽和であるが、表水層下部では前回よりも飽和度が低下し、水深11～15 mの温度躍層付近の減少が目立つ。これは生物の呼吸や有機物の分解による減少と考えられる。また、導電率は表水層下部では低く、前回同様に温度躍層および深水層で

は高い。これは、溶存酸素不足による電解質の溶出によると考えられる。また、 PO_4^{3-} は表水層では一般的に小さな値であり、クロロフィル a 量もさほど大きな値にはなっていない。

第10回（昭和49年10月7日）観測結果

この時期は秋季部分循環期にあたり、水深13～18mの主躍層は少し弱まって存在するが、表面近くの躍層は完全に消滅している。しかし、溶存酸素は水深0～4mでは飽和に近く、水深5～11mでは50％程度の飽和度しかなく、表水層は依然として上部と下部に二分される。表水層上部の水深0～5mではクロロフィル a 量は前回より増加している。また、導電率の深水層での大きな値は、前回、前々回と同様の傾向である。

第11回（昭和49年11月6日）観測結果

この時期は表面付近と底面近くの水温差も小さくなり、温度躍層が水深15～19mに降下し、弱まりながら残存しており、秋季循環期にある。溶存酸素は表水層全体ではほぼ一様となり、90％前後の飽和度となる。取水塔地点においては、深水層上部で溶存酸素の飽和度が50％と回復するが、依然として温度躍層の水深15、16m付近での溶存酸素不足が目立つ膳棚地点においては、表水層から深水層にかけて溶存酸素の回復が見られる。これは水深の浅い部分から深い部分へと混合が進んできたためと考えられる。また、SSおよび濁度が表水層下部では大きい。そして、クロロフィル a は5月に次いで多く、かなりのプランクトンの発生が認められ、後日の神戸市の観測結果によっても確かめられた。このため表水層では栄養塩のリンがプランクトンに摂取しつくされ、ほぼゼロに近い濃度となっている。

2-2 流動調査

千苅貯水池における流動調査は、第1回の観測時より採水による水質調査の後、日没までの残りの時間を利用して行なった。流動観測の困難さは前もって承知していたので、水質調査に重点をおき、採水を水深1mおきに、水質の鉛直分布からフロー・パターンの推定もできるようにした。そのため水温および導電率の現場測定では、温度躍層などの水質の急変部分の測定は50cmごとにして正確を期した。この流動調査は、トレーサーによる流速分布、したがって、フロー・パターンを求めることを目的にした。貯水池が上水および工業用水の専用貯水池であるため、トレーサーとしては塩化ナトリウムを使用し、高濃度の食塩水として合流点の流心部に貯水池水と混合して投入した。その後一定の距離をおいた定点に船を止めて、導電率の現場測定と、採水後実験室での導電率の測定を併用して、貯水池横断方向の3定点で観測を行なった。

また、正方形のベニヤ板にテグス糸を垂らし、測定水深に4枚の矩形のベニヤ板羽根あるいは氷のう袋をつるした湖流板を作製して、流速測定を試みたが、風の影響が大きく、湖流板は四散し、一定の方向性がなく追跡できなかった。

したがって、貯水池全体の流動状態の把握は、水温をはじめ導電率、濁度などの水質の鉛直分布によって行ない、流入端付近における平均流速は食塩によるトレーサー実験より求めている。また、貯水池全体の平均流速の推定は、出水時の濁質をトレーサーと見なして、その滞留時間分布から行なうことができる。

(I) 食塩によるトレーサー実験

(1) 昭和49年1月11日の観測例

この時期は水温をはじめ各種水質因子の鉛直分布がほぼ一様であり、流入端付近における流動は全層にわたって流れる状態にある。測定は、水深が約2 mの合流点に高濃度の食塩水をポリバケツおよびポリびんより短時間に投入した後、100 m下流の定点で導電率測定を行なった。これには、電導度計による直接測定と採水による後日測定を併用して、横断方向に右岸側、中央部、左岸側の3点で約100 mの幅をカバーしている。その測定結果は図3-17に示すように、主流入河川である羽束川よりの右岸側に明瞭なピークが現われている。そのピーク濃度の到達時間17分より平均流速は5.9 m/minで、この時の流量の21,220 m³/d および順流部の推定流水断面積(5 m²前後)を考慮するとこの値は妥当な大きさである。

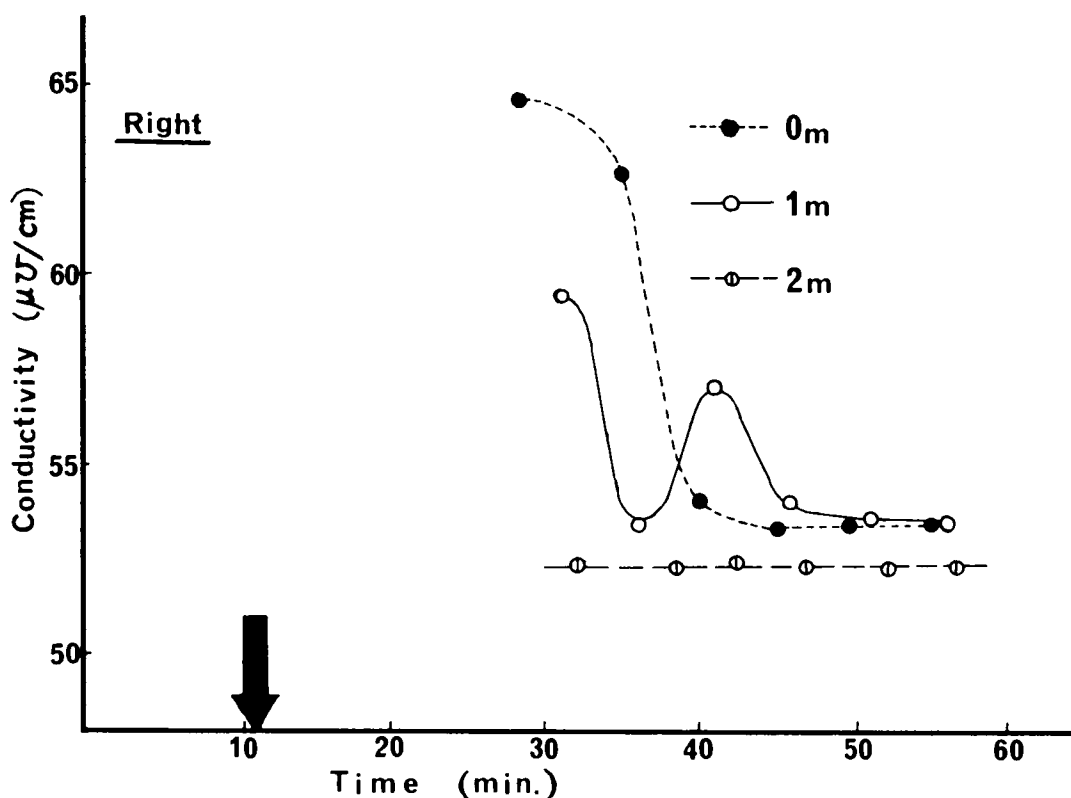


図3-17 トレーサー濃度—時間曲線(1974年1月11日)

(2) 昭和49年4月5日の観測例

この時期は、春季部分循環期にあたり、水深の大きな部分ではすでに弱い躍層が水深約6 mに存在するが、水深が約6 mと浅い流入端付近では水温の鉛直分布は一様に近い。しかし経間には、水表面の方が底面近くより水温が若干高くなっており、この点が前回の1月の場合とは異なる点である。この回は前回と同じトレーサー投入法により100 m下流で同様の測定を行なった。その結果は、図3-18に示すように、羽束川寄りの中央部と右岸側にそのピーク濃度が現われている。そのそれぞれの所要時間11.5分、7分から求めた平均流速は8.7 m/min, 14.3 m/minで、この時の流量52,440

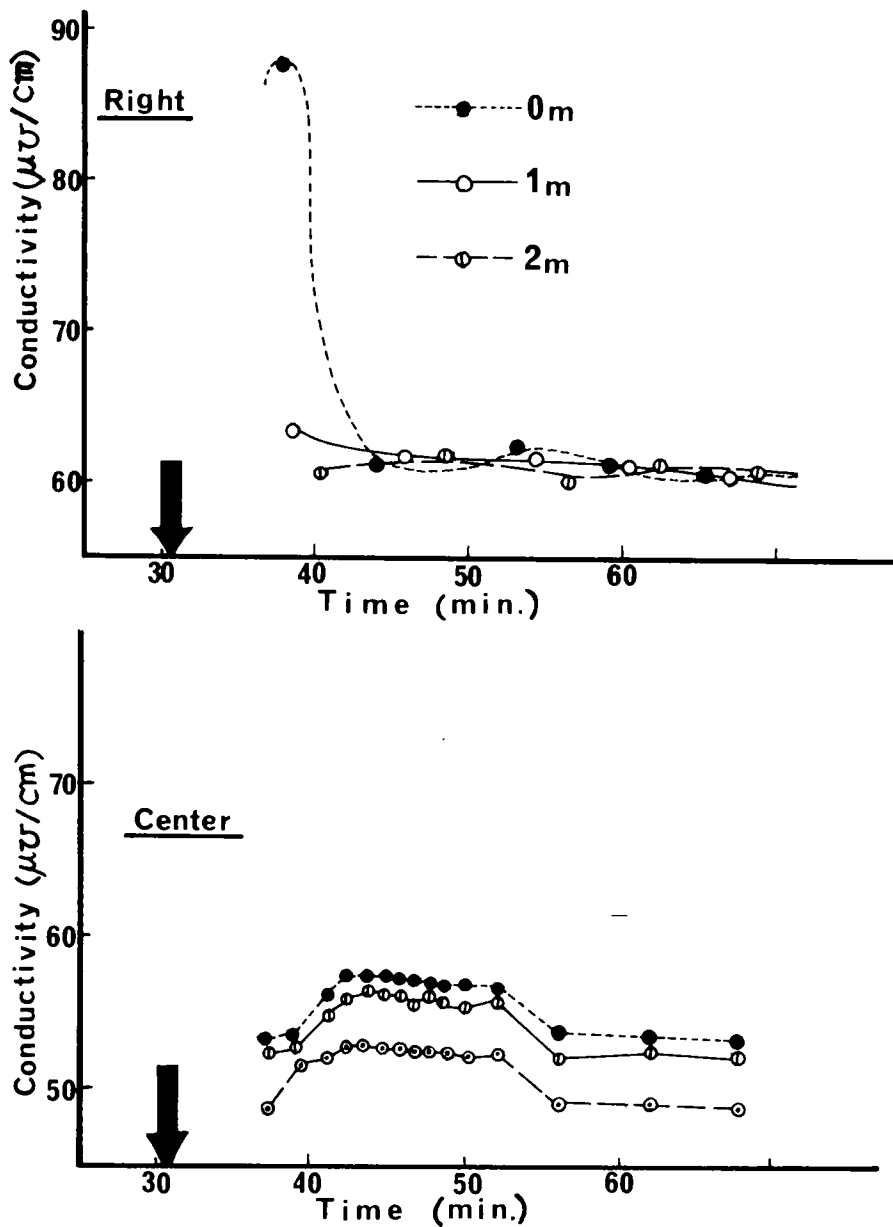


図3-18 トレーサー濃度—時間曲線(1974年4月5日)

m^3/d およびその流水断面積を考慮すると、この流速は妥当な値である。

(3) 昭和49年6月6日の観測例

この時期は夏季停滞期で、水深の大きい地点の水表面下約5mの弱い躍層の他、水深約1.3mに強い主躍層が存在している。一方、水深の小さな流入端付近においては水表面下約5mの弱い躍層の存在のため、水温や他の水質の鉛直分布から温度成層による密度流が予想される。したがって、測定点の距離を約675mと大きくとっても同じ食塩水濃度でもピーク濃度が検知可能と判断して前回と同

様の測定を実施した。その結果は図3-19に示すように右岸側の水深4 mの所にその明瞭なピーク濃度が現われた。所要時間32.5分より求めた平均流速は20.8 m/min で、この値もその時の流量111,740 m³/d およびその流水断面積から考慮して妥当であり、合田⁸⁾の流速測定値に近い値である。

この(1), (2), (3)の3つ場合はピーク濃度が明瞭に現われた例であり、流量的にも流動状態でもそれぞれ異なった場合について結果が得られたことになる。これらの平均流速値はその流量および流れの状態から定まる流水断面積との対応関係からも明瞭なものである。

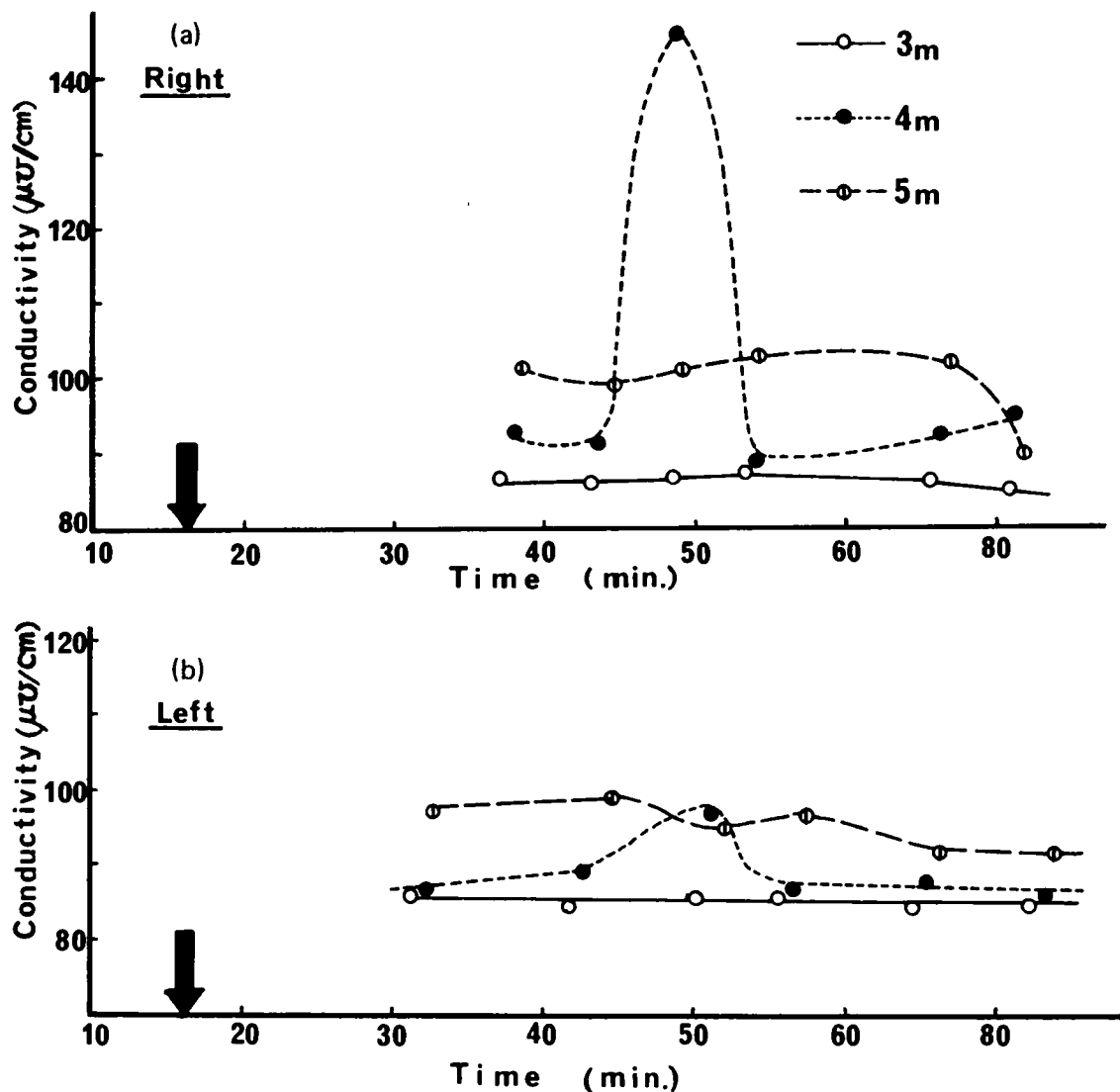


図3-19 トレーサー濃度—時間曲線(1974年6月6日)

(II) 濁質の滞留時間による流速の推定

(1) 昭和47年9月 9日

この夏季停滞期の末期 9月10日の44mmの降雨(羽束地点)による流量1,187,000 m³/dの出

水、17日の79.5mmの降雨（羽束地点）による流量6,503,950 m³/dの出水による濁水流入に伴なう貯水池の直ぐ下流側の浄水場着水井の濁度変化を図3-20に示す。水位はこの間に4m近く回復し、9日の影響は約2日後に濁度の小さなピーク（濁度115度）として、また、17日の影響は約1日後に濁度550度の大きなピークとして現われ、その後かなり高濁度が続き減衰に時間がかかっている。先の降雨による出水後の12日の定期観測より、貯水池全体の濁度分布と、取水塔前および膳棚などの3地点における水温の鉛直分布を図3-21に示す。濁度は水深5mから増加して水深8mで最大濃度になり、水深20m付近まで影響が現われている。これに対応して、導電率は図3-8に示されるような水深5～8mで低い値をとり、水深13mで最小濃度となり、濁度と同様に水深20m付近まで減少が見られる。水深8～13mは2つの取水口位置にあたり、温度成層状態下の中間流（中層流）に乗って濁質が運ばれていることがわかる。ただし、高濁度状態下での導電率の低下については、上流の崩壊土によってその関係を確かめているので第3節において詳述することにする。

(2) 昭和48年10月14日

秋季部分循環期にあたる10月14日に67.5mmの降雨（羽束地点）による流量2,426,630 m³/日の出水で、水位は約1.2m回復し、浄水場着水井への濁度ピークは2日後の16日に260度で出現した。この時の観測による取水塔前、膳棚などの地点における濁度および水温の鉛直分布を、着水井の濁度変化とともに図3-22、図3-23に示す。この時期には水深15～18mに温度躍層が依然として残存しており、流入水はこの厚い表水層全体に広がって流れたと考えられるが、その主流部は水深約5～8mの取水口位置である。

(3) 昭和49年4月9日

この時期は春季部分循環期にあたり、水深6mに弱い温度躍層が形成されているが、表水層の水温の鉛直分布は様に近い状態にあった。9日の降雨は80.5mm（羽束地点）で、流量は3,478,400 m³/日、水位は-0.33mから+0.42mと上昇し、流量の大半は堰堤を越流によって流出した。すなわち、流入水は厚い表水層全体に広がって流入し、上層流となって堰堤を流出している。この時の着水井における濁度変化は図3-24に示すように、3日後に濁度30度のピークとして現われている。

上記の3つの出水の場合について、その有効貯水量に対する理論平均滞留時間、および着水井への濁度ピークの出現時間より、その主流部の平均流速の大きな推定ができる。すなわち、有効貯水量を出水による流入水量で除した計算上の平均滞留時間などから、および流入水量のピークの時刻と着水井の濁度のピーク時刻の時間差などから、流入から流出までの距離に対する所要時間として推定することができる。(1)の9月9日の雨では、2日で1.7 m/min、後の雨では1日で3.5 m/minであり、(2)の10月の場合には2日で1.7 m/min、(3)の4月の場合には2日で1.7 m/minであることがわかる。

第3節 水質分布と季節変化

千苅貯水池は、神戸市水道局の上水および工業用水のための専用貯水池であり、昭和36年頃から定期的に水質調査が行なわれている。とくに昭和41年度からは1か月ごとに定点の定水深において観測がなされ、上水試験項目の多くについて水質分析が行なわれ、その記録が残されている。これらの記録を資料

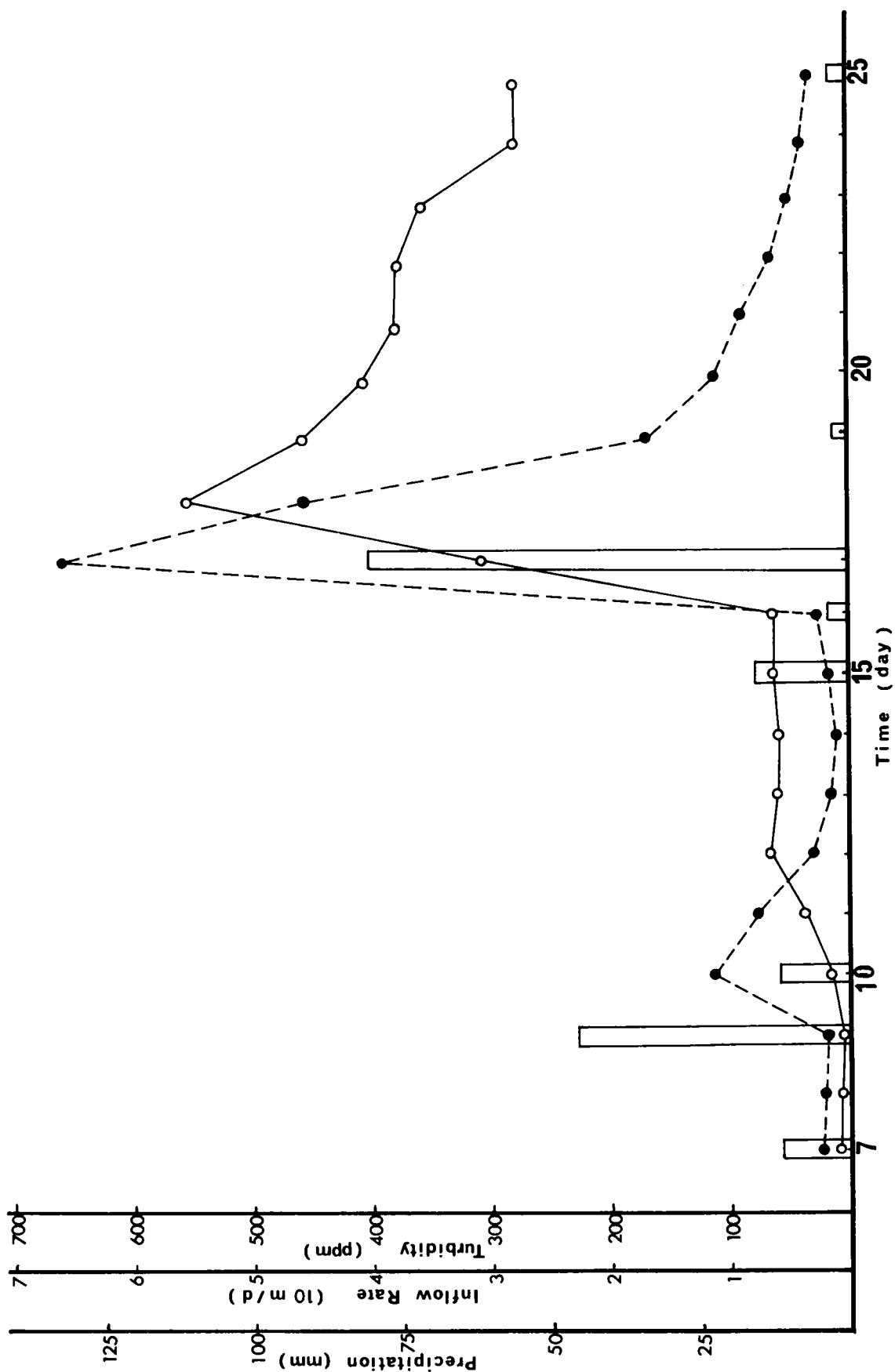


図3-20 1972年9月の降水量、流入量および取水濁度の経時変化

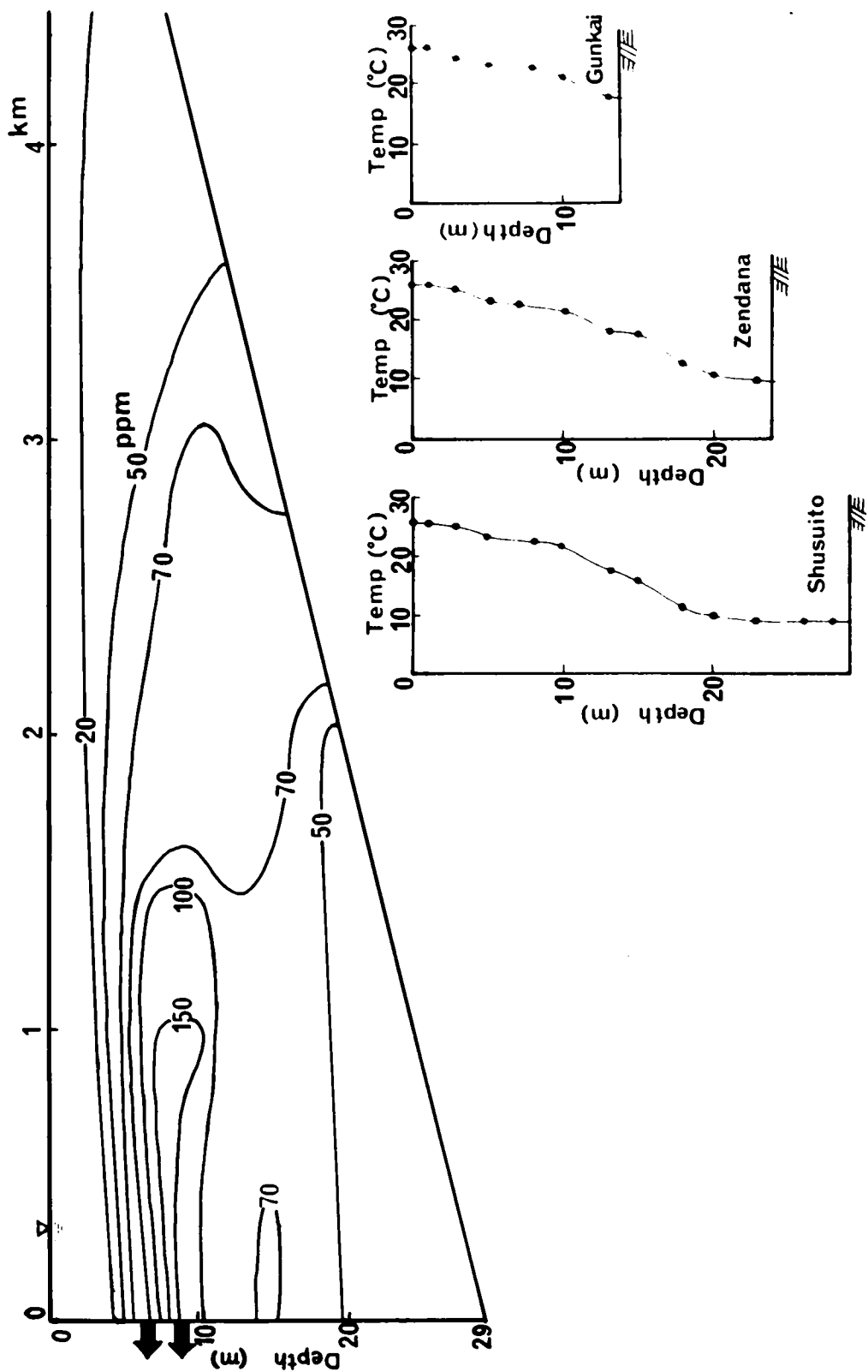


図 3 - 21 1972 年 9 月 12 日の貯水池内濁度分布

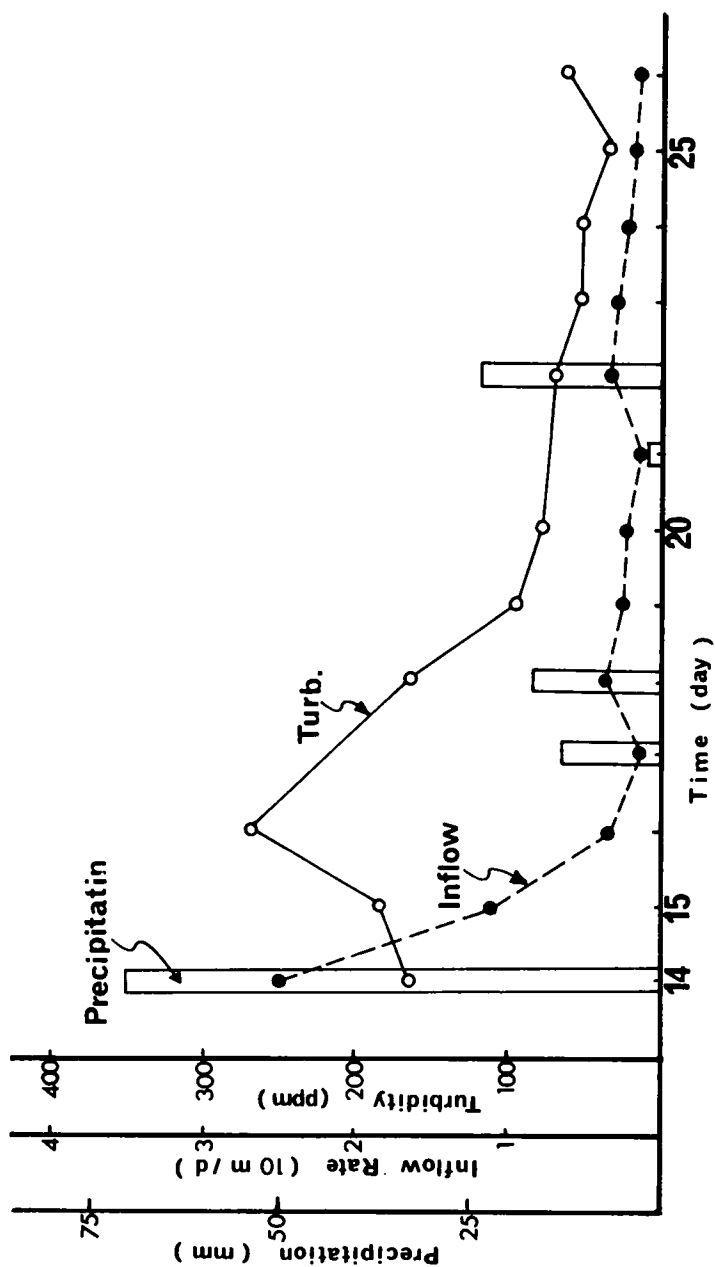


図 3 - 22 1973 年 10 月の降水量, 流入量および取水濁度の経時変化

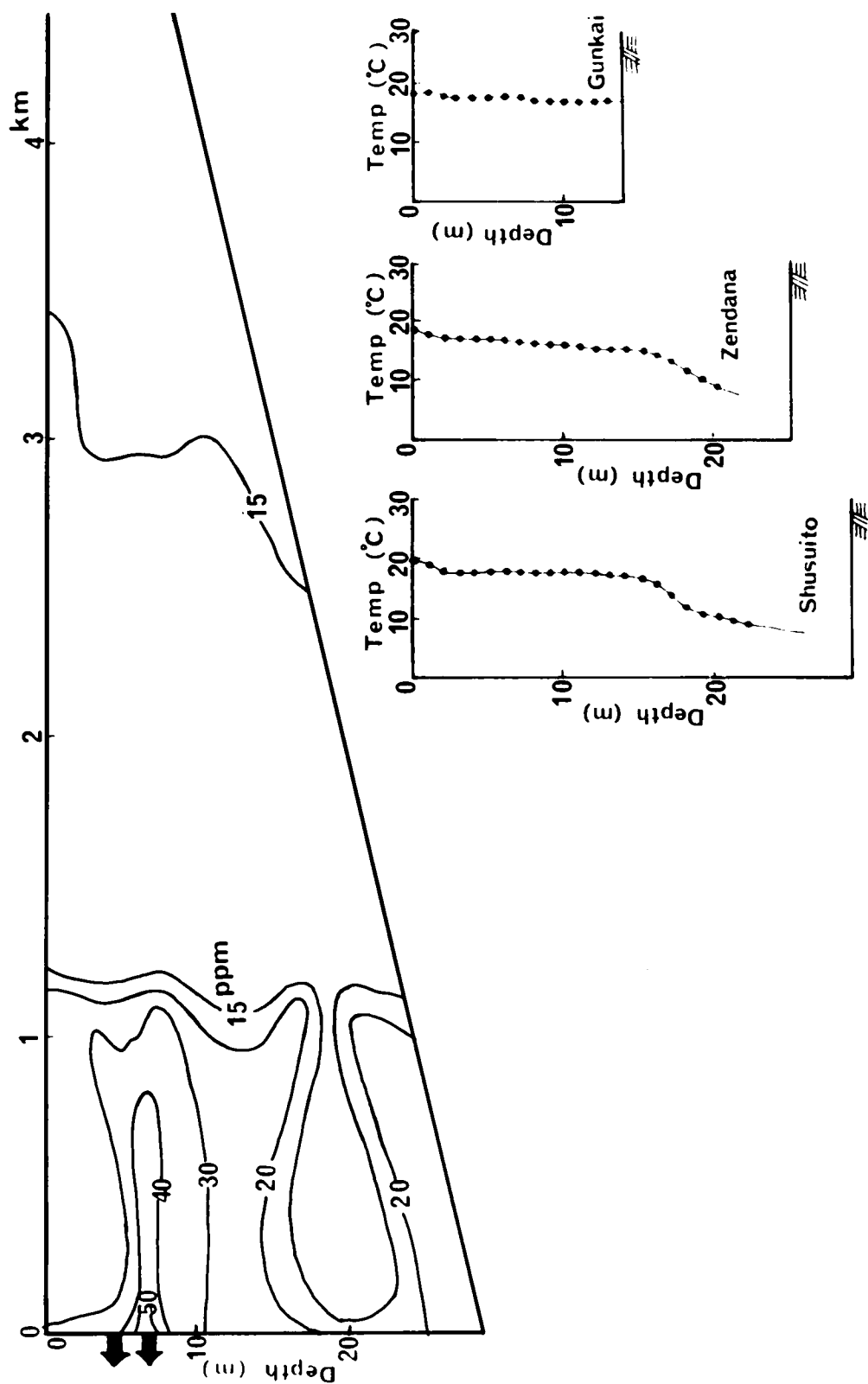


図3-23 1973年10月23日の貯水池内濁度分布

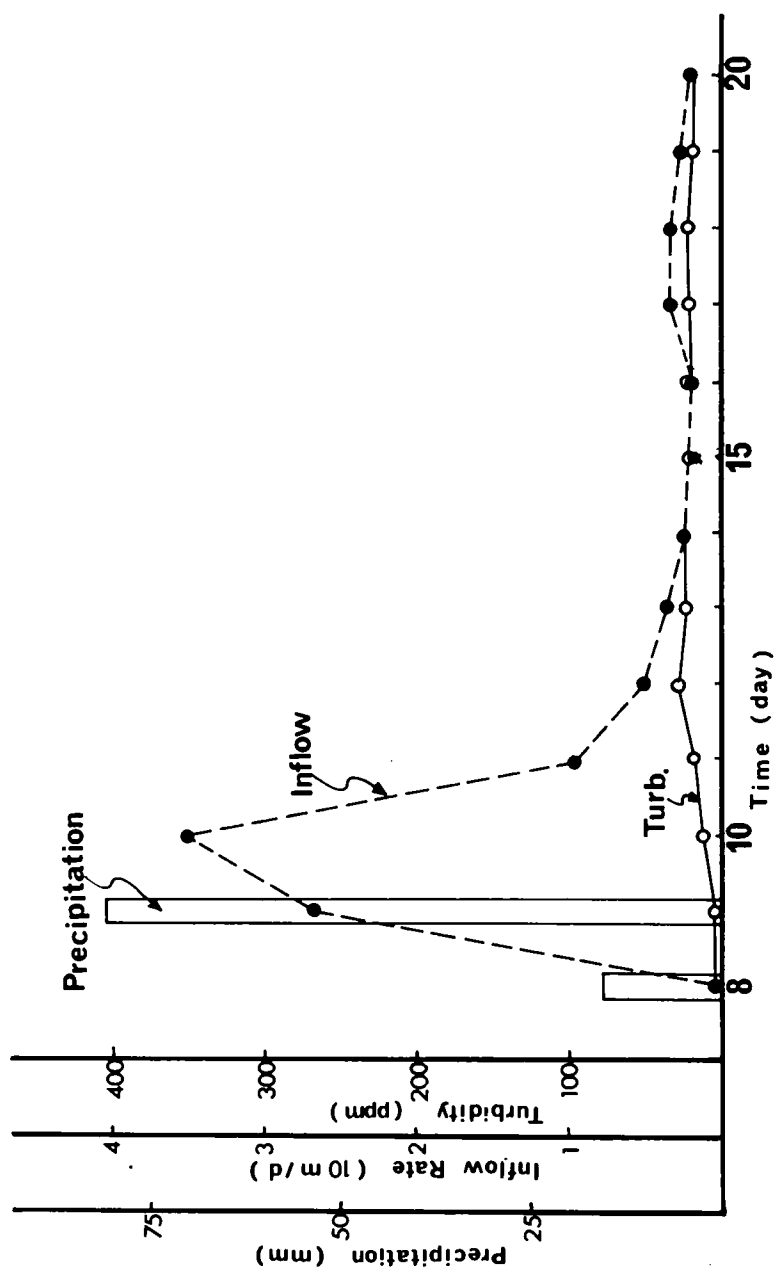


図 3 - 24 1974 年 4 月の降水量, 流入水量および取水濁度の経時変化

として利用することができたので、今回の調査結果と併せて、調和分析を中心とした検討を進めることにする。ここで用いるデータは、 PO_4^{3-} 、TOC など表 3-3 に示される 9 水質因子の昭和 48 年 10 月から昭和 49 年 11 月までの 11 回の観測値以外は、神戸市水道局の水質試験成績によっている。

(1) 水 温

まず他の水質因子に大きな影響力をもつ水温の周年変化を、昭和 48 年度の膳棚地点について、等温線で第 2 章の図 2-2 に示している。図中の等温線が密集し、その間隔が非常に詰っている部分が温度躍層である。春から秋にかけては、ほぼ水深が 13～18 m の位置に主躍層が存在し、夏季にはさらに水深がほぼ 5～8 m の位置にも躍層が存在することがわかる。逆に等温線のまばらな部分は鉛直方向の水温差がほとんどないか、あるいは一様な水温の時期および水深を表わしている。したがって、貯水池をこの一様に近い水温の部分と、水温の急変する部分に層分割することが可能となり、それぞれの部分で、他の水質も一様に近い部分と、急変する部分に分かれることになる。また、各地点、各水深の水温周年変化は一年を周期とする正弦あるいは余弦関数でほぼ近似しうるパターンを有しており、その平均値、振幅、初期位相角に、その地点、その水深の特性が反映されている。そして、これには当然のことながら、同様に 1 年を周期とする正弦（あるいは余弦）関数で近似できる日射量の変化、さらには、日照時間の変化と対応していることはいうまでもない。

取水塔前と膳棚の両地点については昭和 41 年度～48 年度の 8 年間、郡界と合流の両地点については昭和 42 年 8 月から 49 年 7 月までの 7 年間の神戸市水道局の観測データをもとに、そのコレログラム（系列相関係数）で 12 カ月周期が卓越することを確認した上、調和分析によってその変化の関数近似を行なっている。このデータ解析では、その 8～9 年間の変化に長期的傾向のないこと、すなわち定常的な周期変化であることを F 検定（有意水準 1%）で確かめる時系列解析によっている。^{9,10)} コレログラムは膳棚地点の例として図 3-25 に示し、関数近似の結果は表 3-5 に示すが、半年周期以下はあまり意味がない。この結果、水温変化の関数近似は精度が高く、温度躍層部および深水層での精度が落ちるほかは、その変化の 90% 以上をカバーしている。例えば膳棚地点の水深 1 m の水温変化は次式で示され、実測値の 93.6% がカバーされる（図 3-26 参照）。

$$\theta = 17.002 + 10.908 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}t - 1.923\right) \quad (3-1)$$

$$\text{ただし、}\begin{cases} \theta : \text{水温} (^{\circ}\text{C}) \\ t : \text{時間} (\text{月}), \quad t=0 \text{ を 4 月とする} \end{cases}$$

また、成層状態の有無および温度躍層の強度を支配する水温の鉛直分布から、温度躍層部の温度傾度 ($\partial\theta/\partial z$) を求めてその大きさと位置を示したものが図 3-27 である。これから温度躍層の位置および強度の変化が一見できる。温度躍層強度が一番大きいのは 7 月で $6.1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ を越え、表面近くの温度躍層の強度は、昼間の日射量の変化によって変動する。とくに、取水塔の表面近くの躍層強度は、測定時間が他の地点より早く午前 10 時頃のため、まだ十分温められておらず、その値は小さく現われていることが多い。

また、水深や流下距離による違いについては、第 5 章第 2 節でさらに詳しい解析を行なうので、こ

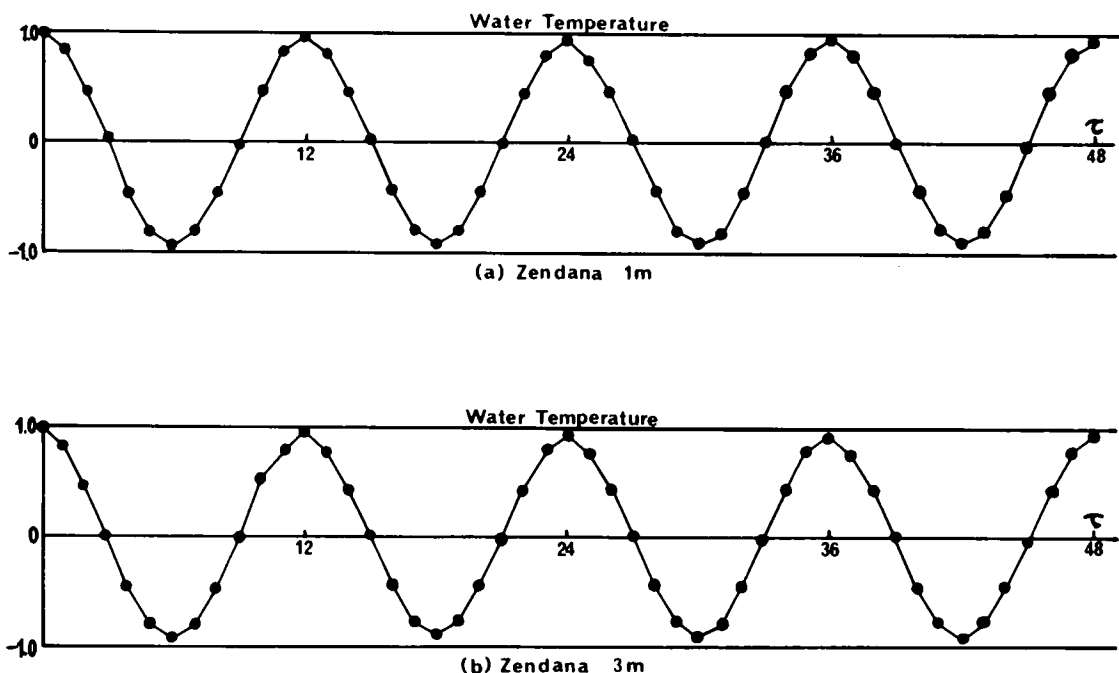


図3-25 水温コレログラム（膳棚地点）

では触れないことにする。

(2) 溶存酸素

溶存酸素についても、水温の場合と同様にその周年変化を昭和48年度の膳棚地点について等濃度（飽和度）線で示したものが第2章の図2-11である。秋季から冬季にかけての全循環期には全層がほぼ一様でかつ飽和度70%以上の分布状態であるが、春季から夏季にかけての成層期には、水深0～5mの過飽和から、温度躍層部と深水層の飽和度30%以下の鉛直分布状態となる。とくに夏季から秋季にかけて、水深18m以深の層での30%を割る値が他の水質因子との関連から注目される。表面近くの過飽和状態は、日光の到達率のよい水深での植物プランクトンによる光合成の影響であり、温度躍層およびその下部での生物の呼吸や有機物分解に伴う不足が明瞭にわかる。飽和度が30%以下になる夏季（ほぼ8月）の最小水深点と、底面と同じく30%以下になる春および秋の2点とで囲まれるほぼ三角形の部分が不足度の大きい部分であり、この三角形の底辺の拡大および頂点の上昇は、マンガ・鉄の溶出や栄養塩の溶出回帰など水質悪化と直接結びつく。

また、溶存酸素濃度およびその飽和度の周年変化は、水温の場合と同じように調和分析によって1年を周期とする正弦（あるいは余弦）関数で近似できるが、その近似度は30～80%と水温に比べて悪くなる。これも表3-6に示すようにその位置、およびその水深によって振幅および初期位相角、そしてその近似度が異なる。溶存酸素濃度およびその飽和度はそのコレログラム（図3-28参照）から、水温と同様に長期傾向はなく、12カ月周期が卓越した定常的な変化を繰り返す。その一例として、膳棚地点の溶存酸素の濃度および飽和度の水深1mの変化は、12カ月周期変動成分のカバーする範囲は50

表 3-5 水温の調和分析結果（膳棚地点）

水深 (m)	系 平 均 値	系列分散	12ヵ月周期				6ヵ月周期				4ヵ月周期				3ヵ月周期			
			振	幅	初 期 位 相 角	分散比	振	幅	初 期 位 相 角	分散比	振	幅	初 期 位 相 角	分散比	振	幅	初 期 位 相 角	分散比
0	17.336	65.900	11.092	1.903	93.4	0.769	6.277	0.4	1.325	0.313	1.3	0.794	1.714	0.5				
1	17.002	63.542	10.908	1.923	93.6	0.719	6.264	0.4	1.289	0.365	1.3	0.845	1.698	0.6				
3	15.992	54.124	9.956	1.995	91.6	1.028	6.155	1.0	1.220	0.499	1.4	0.867	1.846	0.7				
5	14.965	46.992	8.867	2.084	83.7	1.556	6.246	2.6	1.140	0.957	1.4	0.935	2.636	0.9				
8	13.991	35.345	8.126	2.163	93.4	1.235	0.210	2.2	0.240	1.880	0.1	0.168	4.071	0.0				
10	13.183	29.596	7.419	2.221	93.0	1.208	0.309	2.5	0.240	2.667	0.1	0.230	4.622	0.1				
13	11.971	23.372	6.366	2.290	86.7	0.832	0.603	1.5	0.485	4.490	0.5	0.085	5.493	0.0				
15	11.864	24.824	5.372	2.392	58.1	0.731	0.541	1.1	0.635	4.737	0.8	0.275	6.168	0.2				
18	10.847	19.462	3.448	2.567	30.6	0.770	0.893	1.5	0.732	4.828	1.4	0.356	0.038	0.3				
20	8.954	10.824	1.253	2.690	17.3	0.525	1.033	3.0	0.240	5.825	0.6	0.074	4.512	0.1				
23	7.686	4.527	0.194	1.217	53.9	0.037	5.204	1.9	0.029	0.315	1.2	0.027	0.489	1.1				
備考	単位；℃ 初期位相角はラジアン，分散比は％である。																	

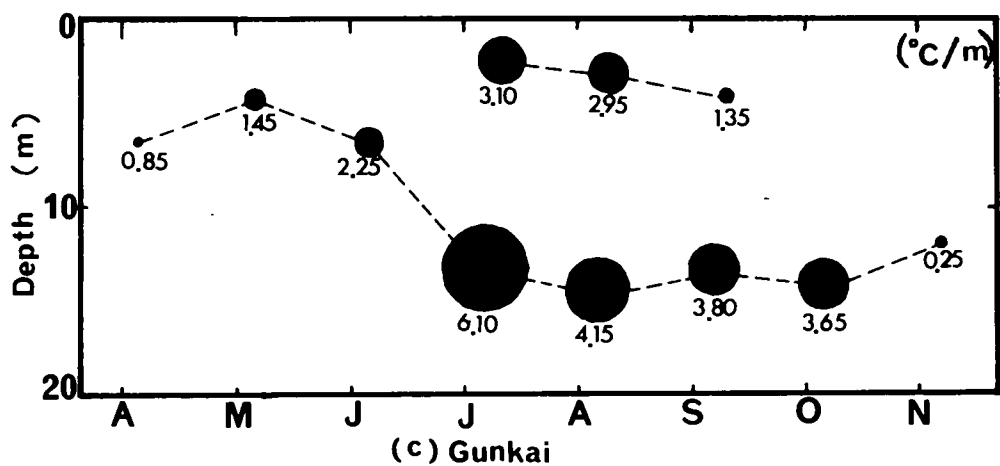
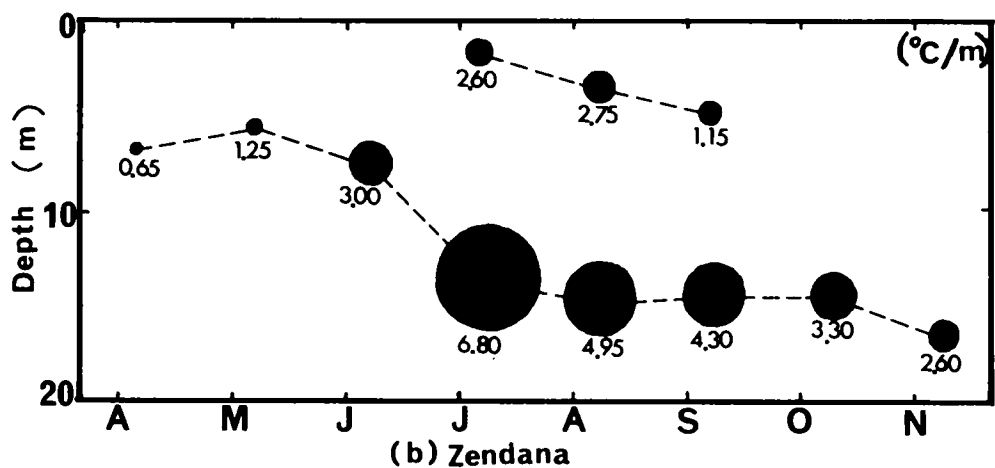
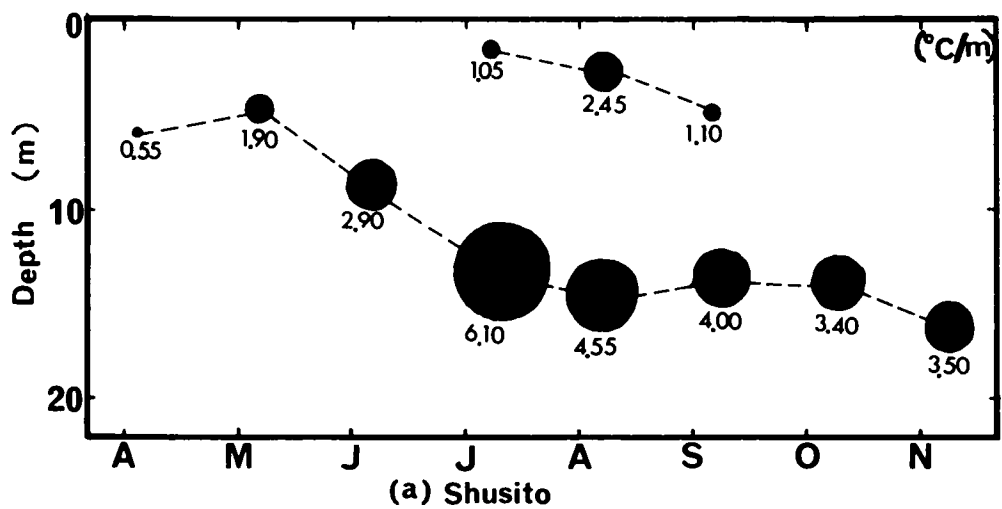


図 3 - 27 最大温度傾度 $(\frac{\Delta\theta}{\Delta z})_{\max}$ の位置と大きさの変化 (1974 年)

表 3 - 6 溶存酸素飽和度の調和分析結果 (膳棚地点)

水深 (m)	系 平 均 値	系 列 分 散	1 2 カ月周期			6 カ月周期			4 カ月周期			3 カ月周期		
			振 幅	初 期 位 相 角	分 散 比	振 幅	初 期 位 相 角	分 散 比	振 幅	初 期 位 相 角	分 散 比	振 幅	初 期 位 相 角	分 散 比
0	1.064	0.035	0.194	1.217	53.9	0.037	5.024	1.9	0.029	0.315	1.2	0.027	0.489	1.1
1	1.068	0.039	0.214	1.235	58.6	0.034	4.703	1.5	0.025	0.125	0.8	0.026	0.544	0.9
3	1.001	0.027	0.146	0.918	39.3	0.051	5.710	4.7	0.064	0.647	7.6	0.047	1.889	4.1
5	0.818	0.031	0.134	5.929	28.8	0.078	0.323	9.8	0.020	1.579	0.6	0.021	4.084	0.7
8	0.771	0.042	0.212	5.475	53.3	0.061	0.869	4.4	0.058	4.068	4.0	0.041	5.419	2.0
10	0.735	0.057	0.235	5.465	48.6	0.043	4.598	1.7	0.079	4.787	5.5	0.024	0.369	0.5
13	0.680	0.077	0.282	5.436	51.5	0.050	1.984	1.6	0.070	4.907	3.2	0.019	0.734	0.2
15	0.622	0.091	0.331	5.412	60.4	0.048	2.317	1.3	0.044	5.088	1.0	0.026	5.959	0.4
18	0.481	0.124	0.436	5.549	76.6	0.080	3.222	2.6	0.037	5.763	0.5	0.019	5.160	0.5
20	0.432	0.127	0.458	5.611	82.5	0.086	3.608	2.9	0.056	1.430	1.2	0.029	5.234	0.3
23	0.319	0.122	0.440	5.708	79.2	0.112	4.187	5.1	0.068	4.224	1.9	0.045	0.277	0.8
備 考	初期位相角はラジアン, 分散比は%													

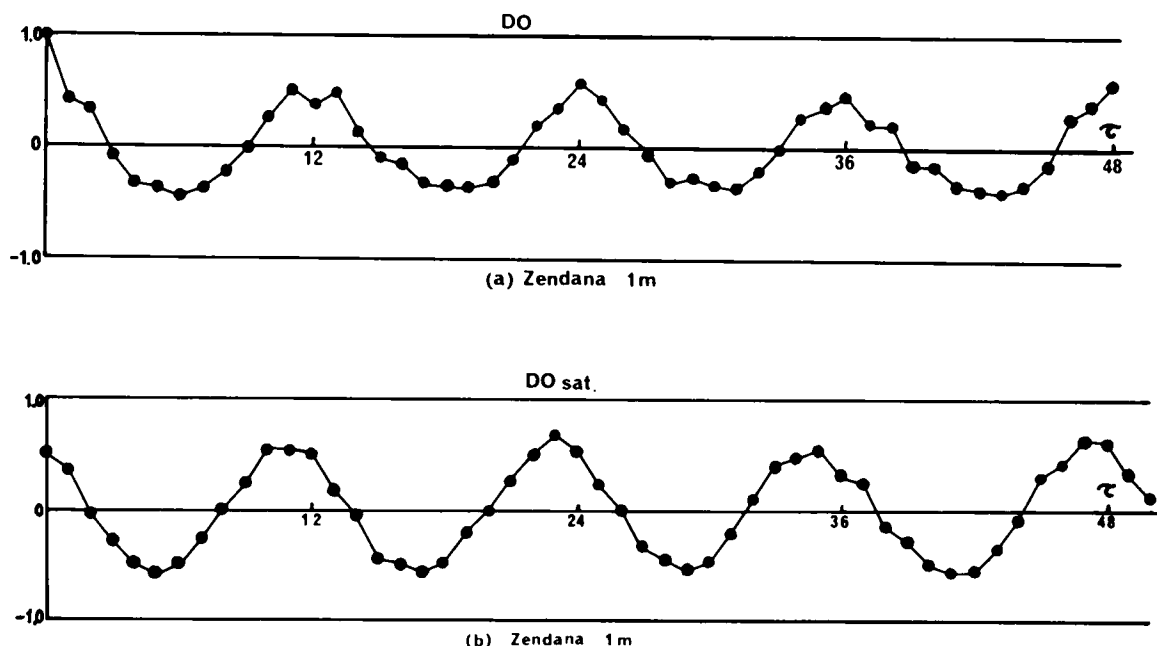


図 3-28 溶存酸素濃度および飽和度コレログラム（膳棚地点）

%前後であり、次式によって表わされる。

$$C_{DO} = 10.13 + 1.44 \cdot \cos \left(\frac{\pi}{6} t - 6.129 \right) \quad (3-2)$$

$$C_{DO_{sat.}} = 110.7 + 21.2 \cdot \cos \left(\frac{\pi}{6} t - 1.292 \right) \quad (3-2')$$

ただし、 $\begin{cases} C_{DO} : \text{溶存酸素濃度 (ppm)} \\ C_{DO_{sat.}} : \text{溶存酸素飽和度 (\%)} \\ t : \text{時間(月), } t = 0 \text{ を 4 月とする} \end{cases}$

ここで、半年以下の周期のものはカバーする範囲も小さく、あまり意味がないので省いてある（図 3-29 参照）。

さらに、溶存酸素の濃度と飽和度による調和解析結果の比較を 1 年周期のものについて行なうと、表 3-6 のように水深 1 m と 3 m の場合、その初期位相角の相違からピークの時期が水温による飽和濃度の変化によって、濃度の場合が早く 4 月から 5 月に出現し、飽和度は 5 月から 7 月と遅れて現われる。また、その 1 年周期の余弦関数でカバーできる両者の比率が水深 1 m と 3 m で逆転している。これは、水深の差異による光合成作用の影響の多少によるほか、水温の鉛直分布の違いからもたらされるものである。

とくに、溶存酸素の鉛直方向および流下方向の変化については、第 5 章第 4 節においてその定量的な検討を加えることになる。

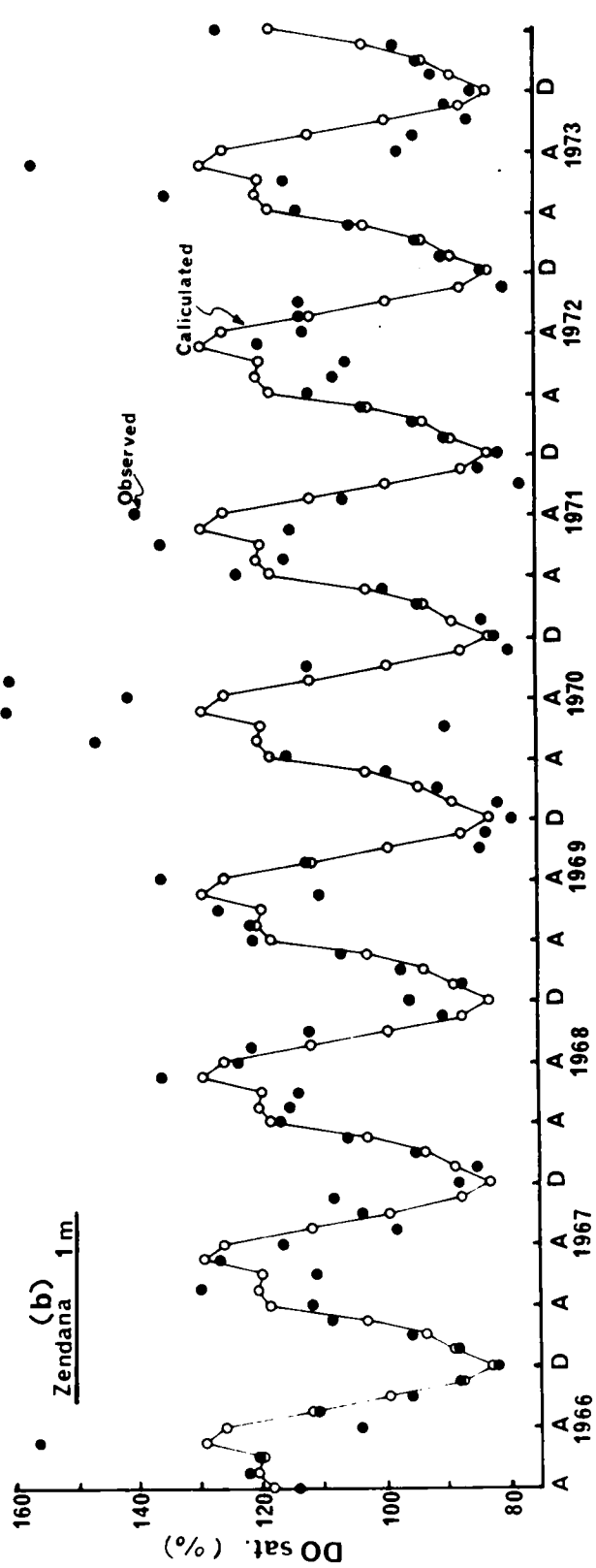
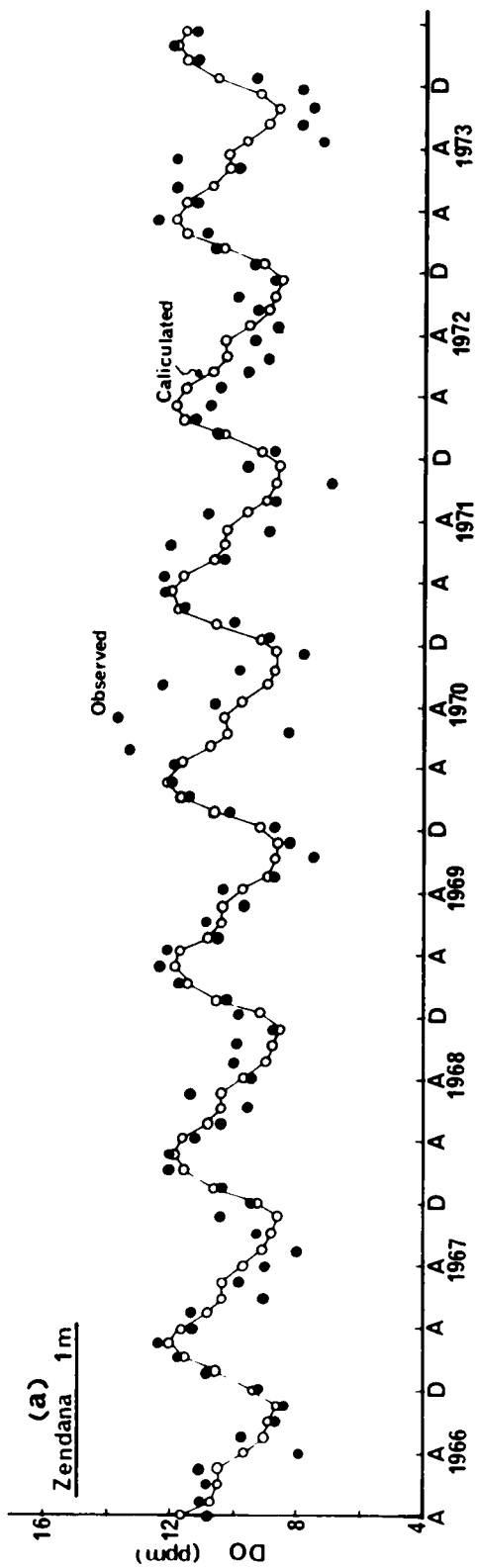


図 3-29 DO 濃度および飽和度の経年変化と時系列解析結果 (膳棚地点)

(3) pH

pHは、第2章で述べたように生物の光合成作用、呼吸作用、および細菌の分解作用の影響で時間的変化（周日変化）と水深方向変化があるが、測定時間が昼間の正午をはさんだ数時間の間のほぼ一定時刻に、しかも晴天、曇天および小雨の日に行なわれている。したがって、周日変化は追求できないので、その水深方向の変化および季節変化を検討する。

上記の3つの作用は CO_2 および O_2 とも関係があり、測定項目の溶存酸素との相関が大きい。したがって、植物プランクトンを中心とする光合成作用によって春から秋にかけてpHは7よりかなり大きく、pH 10以上に達することもある。

時系列解析によると経年変化はなく、図3-30に示すコレログラムからも明らかなように1年周期の卓越した定常的な変化を見せる。水深3 m、5 mの調和分析による余弦関数近似の精度は表3-7のように順に悪くなり、光合成作用の大きさの違いがはっきりと現われる。その一例として、膳棚地点の水深1 mのpHの変化の余弦関数表示は、次式で示されるが、半年以下の周期のものはそのカバーする比率も低く、意味もあまりないので省いた形で示す。1年周期では変動全体の58.4%をカバーしている（図3-31参照）。

$$C_{\text{pH}} = 7.54 + 1.05 \times \cos \left(\frac{\pi}{6} t - 1.420 \right) \quad (3-3)$$

ただし、 $\begin{cases} C_{\text{pH}} : \text{pH} \\ t : \text{時間(月)}, t = 0 \text{を} 4 \text{月とする} \end{cases}$

これから、溶存酸素の飽和度の1年周期の位相の違いによって、DO飽和度のピークよりpHのピークが少しだけ遅れて現われることがわかる。

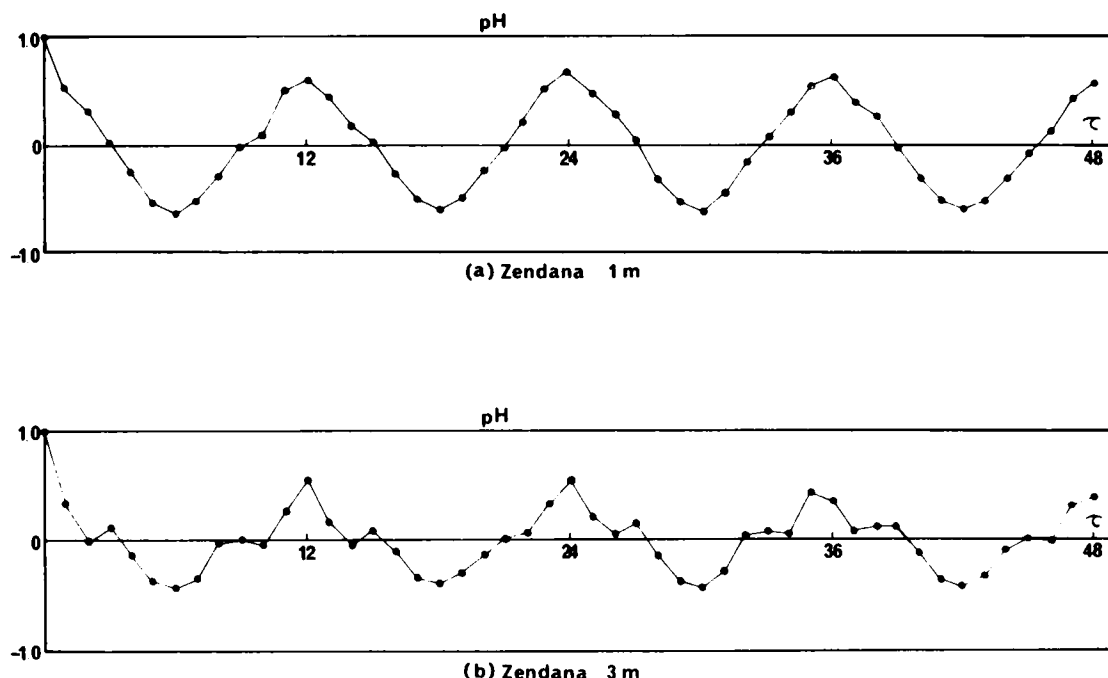


図3-30 pHコレログラム（膳棚地点）

表 3-7 表層のpH調和解析結果（膳棚地点）

水 深		0 m	1 m	3 m	5 m
系 列 平 均 値		7.54	7.54	7.29	6.87
系 列 分 散		0.935	0.950	0.659	0.174
12周 カ期 月成 分	振 幅	1.04	1.05	0.69	0.16
	初期位相角	1.448	1.420	1.421	1.126
	分 散 比	57.6%	58.4%	35.8%	7.6%

また、pHと関連の大きいアルカリ度については、後の第4節で述べることにする。

(4) 濁度，SS，色度

濁度やSSの変化は、季節変化よりもむしろ、降雨による大出水時にもたらされる高濁度水の滞留の一時的な変化が中心となっている。これは、流動状態、したがって、流入水量および水温の鉛直分布に左右される季節的な特色が支配的な因子となる。また、この現象は、流入高濁度水をトレーサーと見なせば滞留時間を含めた流動状態の解析に役立つが、現実には濁質の長期滞留として水質管理上の問題になっている。この大出水時の一時的な高濁度状態は、著者らの観測の昭和48年10月14日の降雨のほか、神戸市水道局の観測による昭和47年9月9日、17日の降雨、および昭和49年4月9日の降雨の場合の例がある。これらは、夏季停滞期の末期、春季および秋季の部分循環期にあたり、その流動状態と濁度分布との対応が明らかであり、これについては先の第2節で詳述している。

また、大出水による一時的な場合を除いた定常的な鉛直分布の季節変化の特色として、深水層、とくに底層付近においてSSおよび濁度の高濃度、かつ、高い色度が観測されている。これは、密度の小さな浮遊性物質が完全に沈降せず浮遊していたり、循環期に再浮上して残存していることが考えられる。この底層のサンプルは、黒かつ色あるいは茶かつ色の色相を呈しており、SS測定の際のフィルター上のSSの色相から、その色度はマンガンと鉄のイオンによるものと思われる。

そして、昭和49年5月のように表水層上部に大発生した植物プランクトンは、SS量として高い値を示したほか、濁度の値も上昇させている。これは、SS測定やクロロフィル測定の際のフィルターにおける緑色の着色からも確認できる。

また、上流二河川からもたらされる高濁水のSSの長期滞留現象とその沈降速度分布の関係を明らかにするために、羽束、波豆の両流域4カ所の崩壊土のサンプルについて沈降分析を行なっている。その結果は図3-32(a)に示されるように沈降速度が0.005 cm/sec以下のものが80～90%以上で、非常に沈降しにくいことがわかる。また、同じサンプルについて、濁度とSSの関係を示したものが図3-32(b)で、その比例関係が明らかであるが、羽束川と波豆川の両流域の地点によって少しずつ異なっている。これは地質の違いによるものと考えられる。

(5) 溶解性物質，導電率

この水質は浮遊性物質と同様に流入水によってひき起される変化が多いが、千莉貯水池内でも各種の

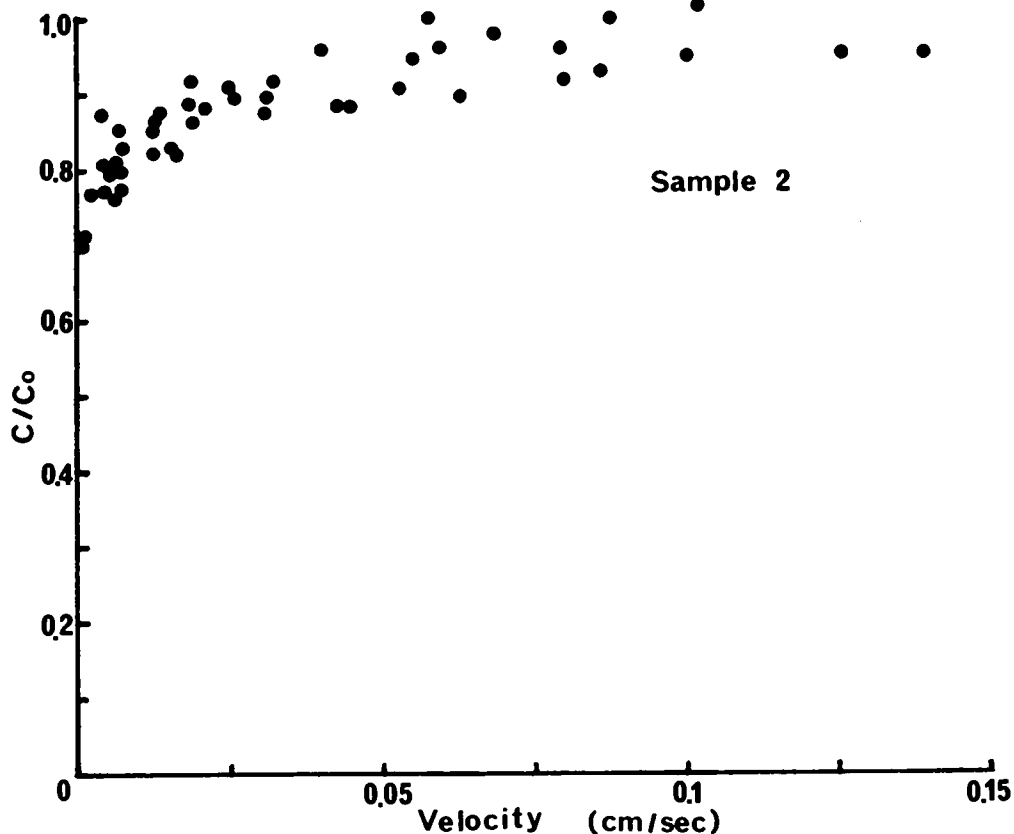


図 3-32 (a)崩壊土試料の沈降分析結果 (千苺貯水池上流)

化学作用の結果も加わって、その変化は複雑である。溶解性物質のうち窒素およびリンは栄養塩類として、重炭酸塩はアルカリ度との関係で第4節で検討されるのでここでは省くことにするが、一般に深水層で豊富であり、その表水層への回帰現象が重要である。

電気伝導度(導電率)は、蒸発残留物と直接比例関係にあり、溶解性物質や浮遊性物質の影響を電解質濃度の形で受けることになる。その値は水温によって変化するために一定水温に換算しての相対的な比較が必要である。千苺貯水池でも溶解性物質の豊富な深水層で高く、とくに底層における値は大きい。さらに、流入水が取水の影響で中間流として変水層を通過する場合や、高濁度水の温度躍層などでの長期滞留の場合、水塊の違いを示す鉛直分布特性を見せる。

なお、千苺貯水池の高濁度水による導電率の変化特性を、昭和48年10月の著者らの観測結果から重視して、その羽束・波豆の両河川の上流域における崩壊土をサンプルとした濁度と導電率の関係を実験的に求めている。その結果は図3-33に示すように、羽束川の2地点は濁度の増加に対して導電率が減少し、貯水池内と同じ傾向を示したが、波豆川の2地点ではその傾きは小さいが逆の現象が現われた。SSと導電率についても同様である。しかし、羽束川の流量が波豆川のその3~5倍であることから、貯水池内では羽束川の影響が大きく現われていることが考えられる。また、このことから両流域に

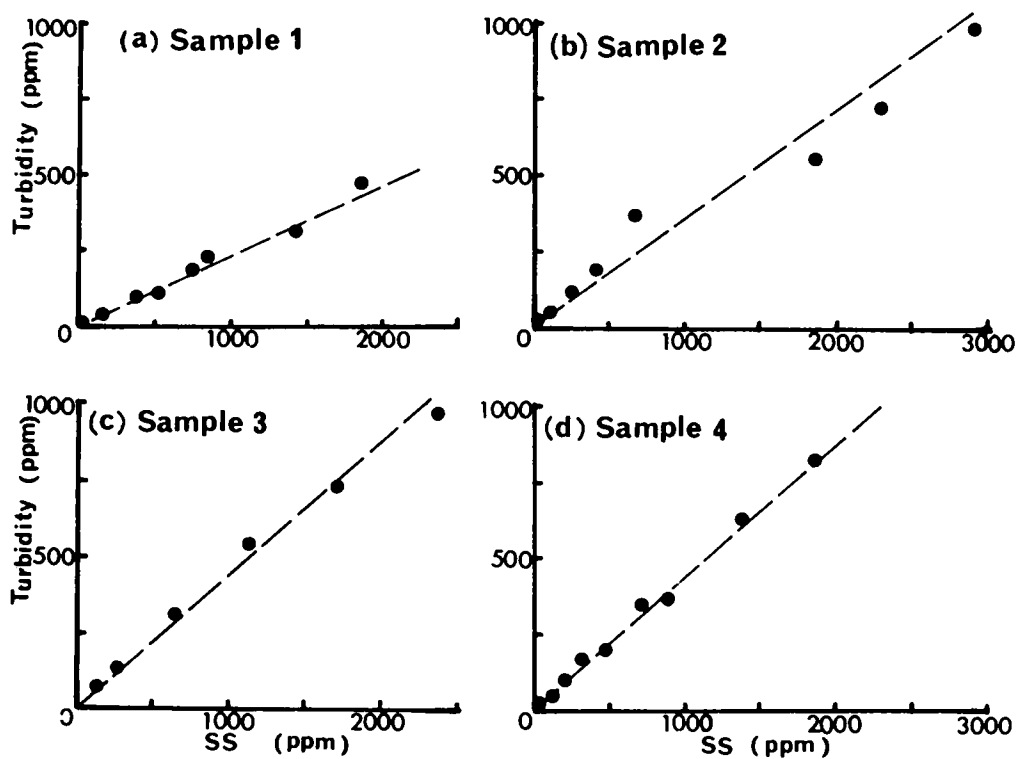


圖 3 - 32 (b)濁度 — SS 曲線 (千苧貯水池上流)

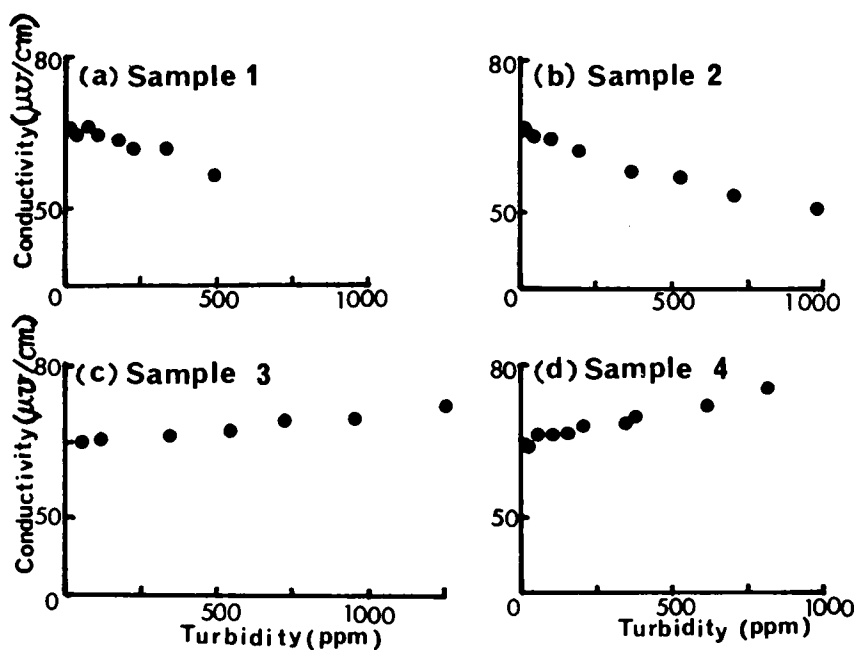


圖 3 - 33 導電率 — 濁度曲線 (千苧貯水池上流)

おける地質の違いも推察することができる。

そして、大出水時には流量の増大に対して濁度は上昇するが導電率が減少することが一般的ゆえ、出水時の水塊の残留によって低い導電率が維持されることも考えられる。

(6) プランクトン，一般細菌

プランクトン数の周年変化には春の5月頃に大きなピークがあり，秋の後半にも小さなピークがあることが多く，その種類では珪藻類が大半である。この状態は貧栄養湖で見られるものに近いが，上記の2つのピーク以外に突発的な大量発生が時には存在し，それは緑藻類によることが多い。藍藻類は富栄養化とともに増加するものであるが，現在までその大量発生には至っていない。他に黄藻類と渦鞭藻類も非常に数が少いが出現している。動物プランクトンは数も種類も一般的に少い。

図3-34に示すように，植物プランクトン数の毎月観測値の年平均値は昭和41年度から昭和44年度までは漸次増加の傾向を見せ，昭和45年度は7月の大発生のため群を抜いて大きく，昭和46，47年度は減少し，昭和48年度，昭和49年は再び増加に転じている。昭和46年度の減少の原因は，この年度の年平均値は水質全般にわたって小さな傾向があり，汚濁も少く平均水質の向上が見られ，栄養塩濃度も低かったためと考えられる。昭和47年度の減少は，昭和46年10月より羽束川上流におけるゴルフ場造成工事による高濁度水の流入によるものである。昭和47年6月には透明度がわずか0.3 mと急減少し，光が水中に十分達せず，出現する植物プランクトンの種類および数とも貧弱化し，昭和48年2月頃からその影響がなくなり回復に向かっている。

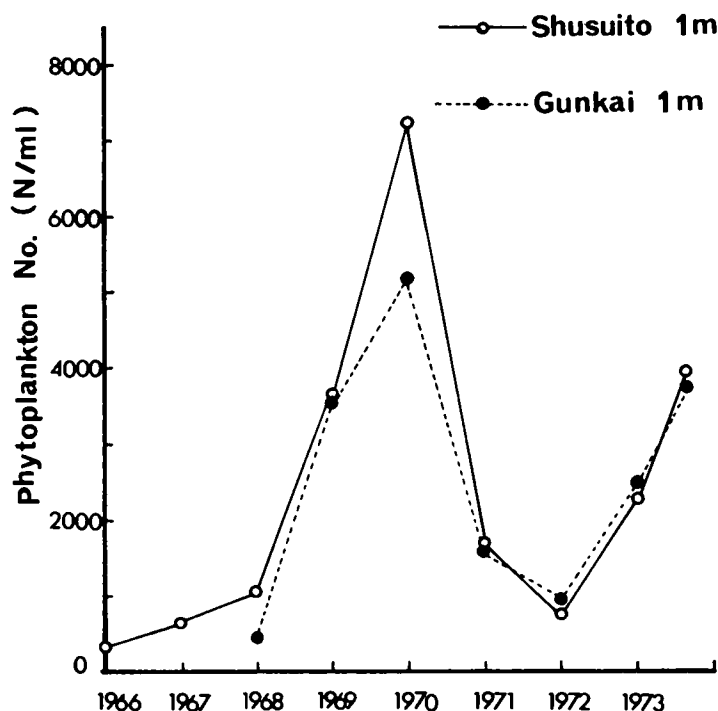


図3-24 植物プランクトン濃度の経年変化（郡界，取水塔前両地点）

この千苺貯水池の出現プランクトンは、羽束川および波豆川の両流域に存在するかんがい用溜池の生物相と一致することが、神戸市水道局の上流調査によって明らかになっており、両河川を通じて供給されている。

植物プランクトンの濃度と著者らの測定によるクロロフィル a 濃度は、密接に関係しておりその相関性は高く、神戸市のプランクトン濃度と著者らのクロロフィル a 濃度の 4 月～11 月までの測定値の相関係数は 0.68 であった。

一方、一般細菌数の増減の状態について昭和 41 年度から昭和 49 年度まで、その年平均値を代表的な水深ごとに図 3-35 に示した。これから、2 年周期の増減が認められるほか、年とともに増加の傾向にあることがわかる。これは細菌が分解して栄養として摂取される有機物質が、水質の汚濁によって増加したことによると考えられる。とくに水深 10 m 前後の増加が顕著であり、温度躍層部における溶存酸素量の減少とよく対応している。

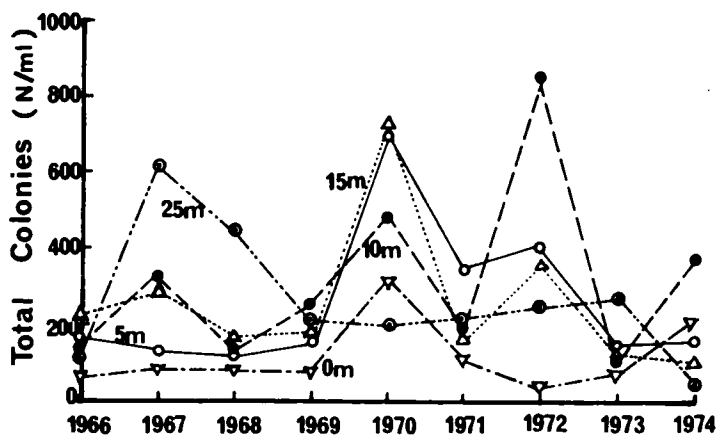


図 3-35 一般細菌数の経年変化（取水塔前地点）

〔けい光度によるクロロフィル a の定量化〕

懸濁物質あるいは浮遊性物質の中に含まれる植物プランクトンの定量法には、検鏡による種属別個体数の測定が水質試験法においては一般的であるが、その生態系としての第 1 次生産量と富栄養化過程との関連を考慮する場合には、クロロフィル a として光合成との関係を求める方が便利なが多い。このクロロフィル a の定量法としては、吸収法とけい光度法があるが¹¹⁾ いずれも試料水を一旦ろ過の後、フィルター上の懸濁物質をアセトンで抽出して光度計にて測定するもので、1 l の試料水をろ過する時間、およびその後の抽出に要する時間が大きすぎる。この点を改善するために試みた測定法が、米国ターナー社、111 型のけい光光度計による直接測定である。この方法は、試料水をけい光光度計のフローセルを通過させ、その時のけい光度の読みを記録するもので、サンプルの注入を押し出し流れにして、連続的にいくつものサンプルの測定が短時間で可能である。試料水は最小で 70～80 cc でよく、測定時間は流過時間にもよるが、10 秒前後である。クロロフィル a 量としては、吸収法あるいはけい光度法などによって検量線を作製しておけば、けい光度から変換できる。このようなけい光光度計の利用は、海洋

などにおける現場の調査¹²⁾の実験室規模への逆利用であり、精度や方法の改善により実用化できうと思われる。

この実験的検証は、藻類が異常発生した琵琶湖南湖の表面水を試料としてけい光光度計に直接通したところ、その指示の読みが希釈段階に対して直線上にプロットできる値を示したので、その後試料として千苺貯水池水、酸化池水および琵琶湖湖水について実験を重ねて行なったものである。まず、藻類を多量に含む酸化池水の濃度の異なるものと、琵琶湖南湖表面水のけい光度とクロロフィルa量の関係を示したものが図3-36である。この図からクロロフィルaは40 $\mu\text{g}/\ell$ の濃度以下の範囲では、けい光度と比例関係が成立することがわかる。このクロロ

フィルaとけい光度の相関については、低濃度では測定誤差が大きいため、低濃度付近に測定点が集中すると相関度は悪くなるが、低濃度から高濃度までまんべんなく分布していると相関度は改善されると思われる。さらに、サンプル中の植物プランクトンが単独種、あるいは優占種の占める割合が大きい場合は、高い相関度が得られる。昭和49年5月の植物プランクトンの大発生時の合流点、長瀬、郡界、膳棚、取水塔前の各水深の合計37サンプルについて、クロロフィルaとけい光度の相関を示したものが図3-37である。

この場合の相関係数は0.871とかなり高い相関を示している。

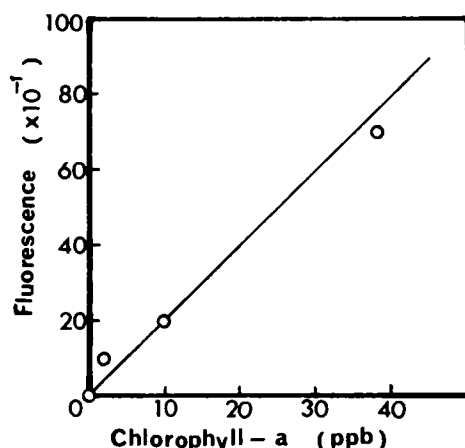


図3-36 螢光度 — クロロフィルa
曲線（酸化池水、琵琶湖南
湖水）

(7) マンガン

マンガンの鉛直分布の季節変化は、溶存酸素の鉛直分布の季節変化と密接な対応関係を有している。すなわち、溶存酸素が飽和に近い状態にある循環期の全層および停滞期の表水層などにおいては、その濃度は小さく問題にはならないが、停滞期の深水層においては、溶存酸素の減少あるいは涸渇に伴ないその濃度は底層に向かって急増する。この溶存酸素の不足状態に対応したマンガン濃度の増加の現象は、流下方向すなわち水深が大きい地点ほど顕著に現われ、最深部を有する取水塔前の地点では最高で昭和49年12月の11 ppmまで上昇している。取水塔前および膳棚地点における最深部の全マンガンの最高濃度とそのときの溶存酸素濃度の変化を示したものが図3-28であり、昭和41年度からの経年変化および季節変化が一見できる。この膳棚地点における変化の時系列解析の結果、経年変化による長期傾向はなく、定常的な周年変化で説明でき、その調和分析結果は次式(3-4)で表わされる。

そのコレログラムから1年周期が卓越しており、変動をカバーする範囲は43.7%であり、半年以下の周期がカバーする比率は小さく、あまり意味がないので省略している。

$$C_{Mn} = 0.958 + 1.007 \times \cos\left(\frac{\pi}{6} t - 3.143\right) \quad (3-4)$$

ただし、 $\left\{ \begin{array}{l} C_{Mn} : \text{全 Mn の濃度 (mg/\ell)} \\ t : \text{時間 (月), } t = 0 \text{ を 4 月 とする。} \end{array} \right.$

これより、そのピーク濃度の出現する時期は10月で、全循環に入って底面付近まで循環が及ぶ直前にDOも最小で、全Mnが最高になることがわかる。

(8) 流 量

千苅貯水池流入水として、羽束川、波豆川、および貯水池周辺からの流入量があり、その流量比は約9:3:1である。この流量をもたらす雨量は年間約1,200mmで、日本の全国平均の1,700~1,800mmに比べて少ない。3つの流入水の合計流量を、水質と同様に昭和43年~昭和49年の7年間について時系列解析を行ない、調和分析による関数表示式を得ている。

$$Q_i(\text{m}^3/\text{月}) = 775,640 + 482,918 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}t - 1.137\right) + 53,878 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3}t - 5.834\right) + 122,440 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}t - 1.154\right) + 285,810 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{3}t - 3.939\right) \quad (3-5)$$

ここで、 t :時間(月)、 $t=0$ を4月とする。

この式では流動変化が大きく、変動の36%しか表わせないので、7年間の各月の平均値を周年変化と考えて、その変化パターンを図3-39に示し、調和分析結果は次式(3-6)で示される。

$$Q_i(\text{m}^3/\text{月}) = 775,640 + 482,919 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}t - 1.234\right) + 53,878 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3}t - 4.264\right) + 122,438 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}t - 4.296\right) + 285,808 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{3}t - 5.510\right) \quad (3-6)$$

この式では、平均値の変動の81.5%を表わせる。その変化パターンは、梅雨期および台風期に多く、8月と秋季から冬季にかけて少ない。この流量変化は、貯水池への流入水質の影響因子として重要なもので、とくに無機性の水質因子との相関は高い。

第4節 水質の経年変化と富栄養化

ここでは、前節で述べたような定常的な季節変化のパターンを見せる水質の周年変化の他に、年毎に全体として増加あるいは減少の傾向のあるものに注目して、それと近年顕在化しつつある富栄養化現象との関連について検討する。貯水池上流域において、人口や生産活動に変化がなければ、年によっては多少の増減があっても水質の基本ベースは一般に変化しないものと考えられる。したがって、変化があれば人口や人為的な原因によるものであり、水質因子の相互間での反応でもなければ直接増加となって現われるの

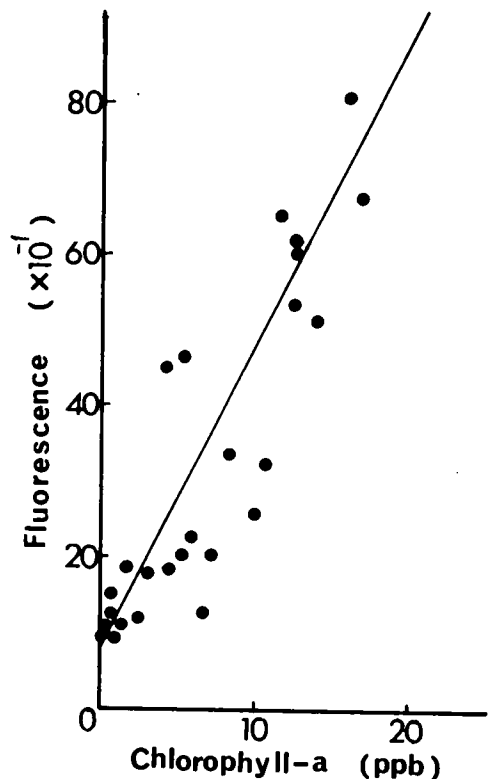


図3-37 蛍光度—クロロフィルa曲線(千苅貯水池水; 1974年5月)

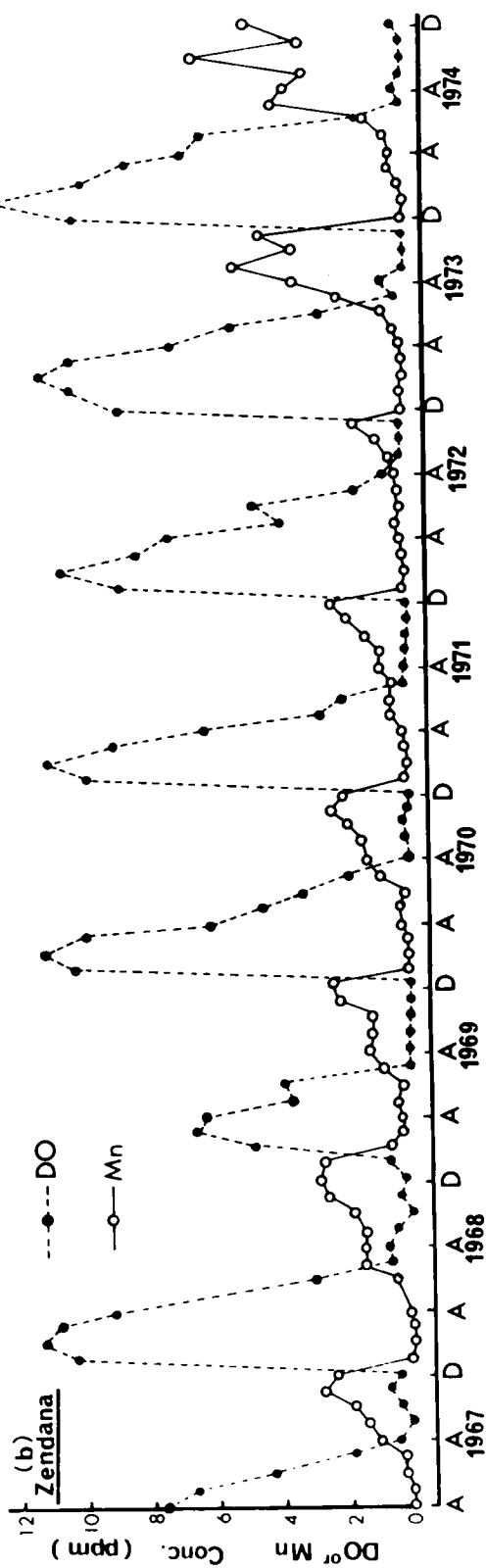
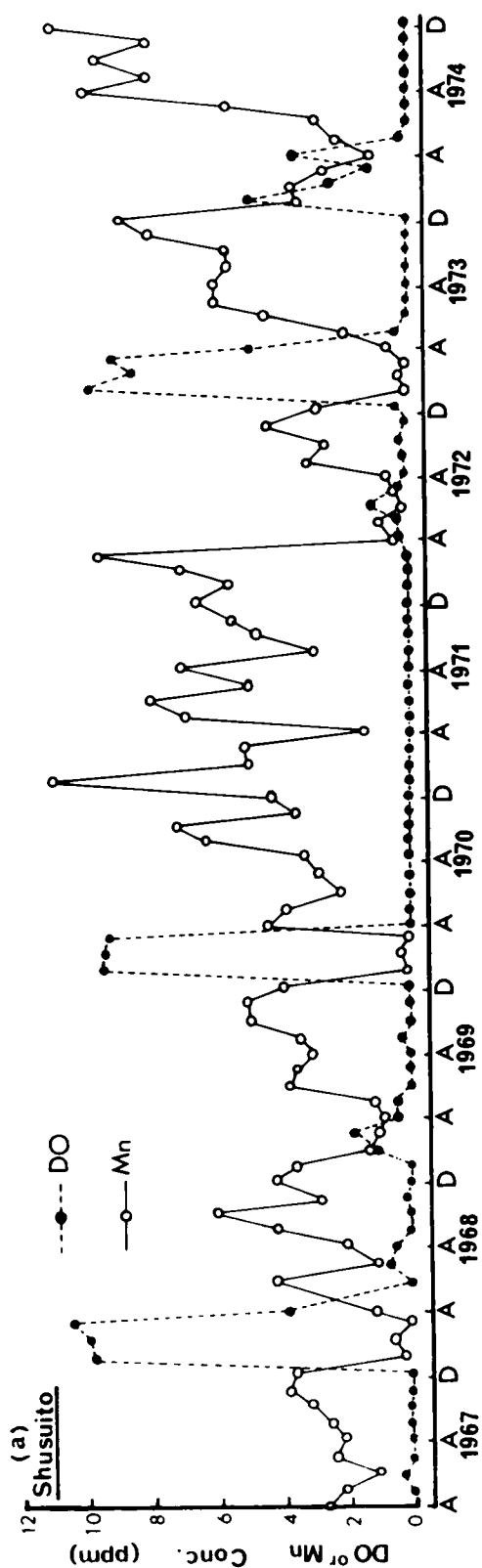


図 3-38 底層の DO および全 Mn 濃度の経年変化 (取水塔前, 磨棚両地点)

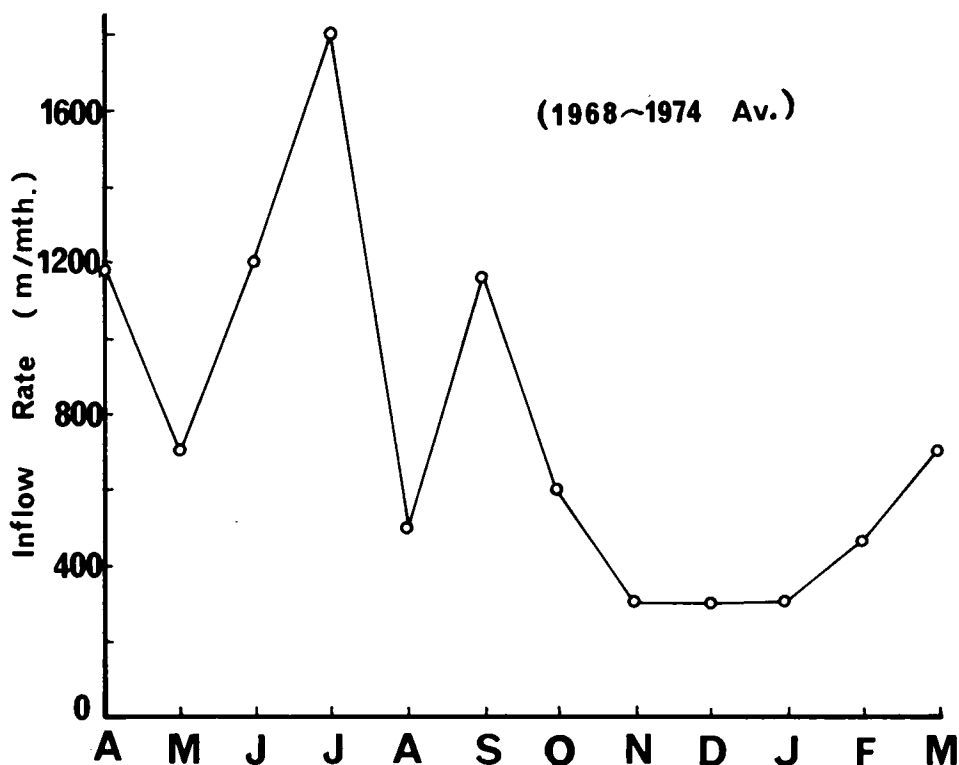


図 3-39 流入水量の季節変化 (千苅貯水池)

が普通で、これは水質汚濁現象として扱えられる。この千苅貯水池流入河川の羽束川および波豆川流域では、全体として人口の増減はないようであるが、農業および畜産業の形態が変化している。すなわち、水田や畑での化学肥料の大量使用や集中的な畜産経営の出現である¹⁾。さらに、この十数年間の日常生活形態の変革は農村にも浸透し、生活排水の質的かつ量的な大きな変化も加わっている。

このような上流域の現状の流入河川水質への影響を定量的に把握する方法に、汚濁原単位を考慮した汚濁負荷量の考え方がある。これによって、流入河川水による栄養塩の負荷の現状を把握して、現在の富栄養化の段階を判定することができる。

第3章第1節で示した表3-2の貯水池集水域における人口、家畜数および土地利用の内訳に応じて、汚濁負荷量を計算し、栄養塩の負荷発生量を把握してみるとつぎの表3-7にまとめられる。この計算に用いた原単位は農耕地流出については中本¹³⁾ 残りは全て井上¹⁴⁾ の値によっている。

これから、窒素、リンとも負荷発生量の内訳では家庭排水が \blacksquare 大きく、家畜排水が \blacksquare 小さいことがわかる。さらに、羽束・波豆の両河川および池周辺からの平均流入量が約1億トン/年であるから、窒素およびリンそれぞれの平均流入濃度は0.755 ppmおよび0.087 ppmとなり、中本による神流湖の例より約2倍の値を示している。この負荷の全部でなく10%が流出しても、表3-8のように Vollenweider¹⁵⁾ (1968) による閉鎖水域とされる湖に対する栄養塩の面積負荷量の危険な水準と比較して、窒素で約2倍、リンで約3倍の値となる。この値からも千苅貯水池が、富栄養化に向かう過程にあることがわかる。

表3-7 栄養塩負荷発生量（千苧貯水池集水域）

排出源	窒 素		リ ン	
	原単位	負 荷 量	原 単 位	負 荷 量
家庭排水（人口：6,600人）	4.38 kg/人/年	28.91 ton/年	0.73 kg/人/年	1.64 ton/年
家畜排水（牛：500頭）	10.22 kg/頭/年	5.11	2.044 kg/頭/年	1.23
農耕地流出（面積：7.8 km ² ）	2,500 kg/km ² /年	19.50	210 kg/km ² /年	4.82
山林流出（面積：86.7 km ² ）	253.3 kg/km ² /年	21.96	14.24 kg/km ² /年	1.02
合 計		75.48		8.71
平均濃度（ppm）		0.755		0.087

ただし、流入水量は1億 m³/年としている。

表3-8 湖沼に対する栄養塩の負荷レベルとの比較
（Vollenweider, 1968）

平均水深 （以浅）	最大許容負荷量 （g/m ² /yr）		超過すると危険な 負荷量（g/m ² /yr）		千苧貯水池（負荷発生 量の10%の流出）	
	N	P	N	P	N	P
5 m	1.0	0.07	2.0	0.13	—	—
10 m	1.5	0.10	3.0	0.20	6.74	0.75
50 m	4.0	0.25	8.0	0.50	—	—

したがって、流入水による汚濁負荷に伴う貯水池内の水質変化の解析を第3節と同様に時系列解析によって確認することになる。すなわち、水質因子のうちで定常的な季節変化に加えて経年変化を示すものを取り出して、調和分析によって水質変化パターンの関数近似を行ない、富栄養化過程との関連を考察する。経年変化の傾向を示すものとしては、無機態窒素（アンモニア態窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素）、過マンガン酸カリウム消費量、アルカリ度である。リン酸イオンおよび TOC は著者らの1年間のデータしか存在しないが、上記の水質因子と同様に経年変化を示すと考えてよいので、ここで取り扱うことにする。

このあとの栄養塩濃度の変化パターンを示す関数表示式は、後の第5章における水質変化と生態系の相関において利用する。この変化パターンは、5月、6月、7月の農業活動の盛んな時期にピーク濃度が出現することから、その土地利用形態に基く肥料の降雨に伴う流出が主な原因となっていると考えられる。

また、生物量としては富栄養化傾向との関連から、植物プランクトンに注目して、クロロフィル a の測定結果と植物プランクトン数を比較し、その高い相関度を確認している。

(1) 窒 素

窒素はリンとともに栄養塩として、植物プランクトンの第1次生産との関係から重要である。この窒素の経年変化は負荷量の増加に伴う富栄養化過程との関連からも注目される。したがって、アンモニア態窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素を合計した無機態窒素について、神戸市水道局の昭和41年度からの8年間のデータを用いて時系列解析および調和分析を行なった。まず、1カ月毎の8年間のデータに対して、F検定により1%の有意水準で経年変化の長期傾向を吟味し、その存在を確認の後、線形回帰法あるいは最小自乗法によって、その平均値および分散を時間の関数として求める。その後、データから経年変化を消去、すなわち、定常化を行なって調和分析によって1年サイクルの変動として捉える。その結果としての調和波の振幅、位相角および平均値の鉛直方向および流下方向の変化を検討する。

図3-40に経年変化を消去したデータによるコレログラムの膳棚地点の例を示し、表3-9に解析結果をまとめて示している。コレログラムより一年周期が卓越しているが、水深3m、5mについてはバラつきが大きい。その経年変化と調和分析の結果の一例として、膳棚地点の水深1.3mについて図3-41に示す。この図より、梅雨期の高流入量時および冬季の循環期に高い値が認められ、年々増加して富栄養化の目安となる0.2ppmを越えており、この湖が富栄養化の過程を進んでいることがわかる。その調和分析による関数近似は48.3%の変動をカバーして次式で表わされる。

$$C_N = (0.150 + 0.00231 \times t) + (0.071 + 0.00097 \times t) \times \left[0.958 \times \cos \left(\frac{\pi}{6} t - 5.025 \right) \right] \quad (3-7)$$

ただし、 $\begin{cases} C_N: \text{無機態窒素 (mg/l)} \\ t: \text{時間 (月)}, t=0 \text{ を昭和41年4月とする。} \end{cases}$

ここで、半年周期以下のものはそのカバーする率も小さく、あまり意味がないので省いてある。

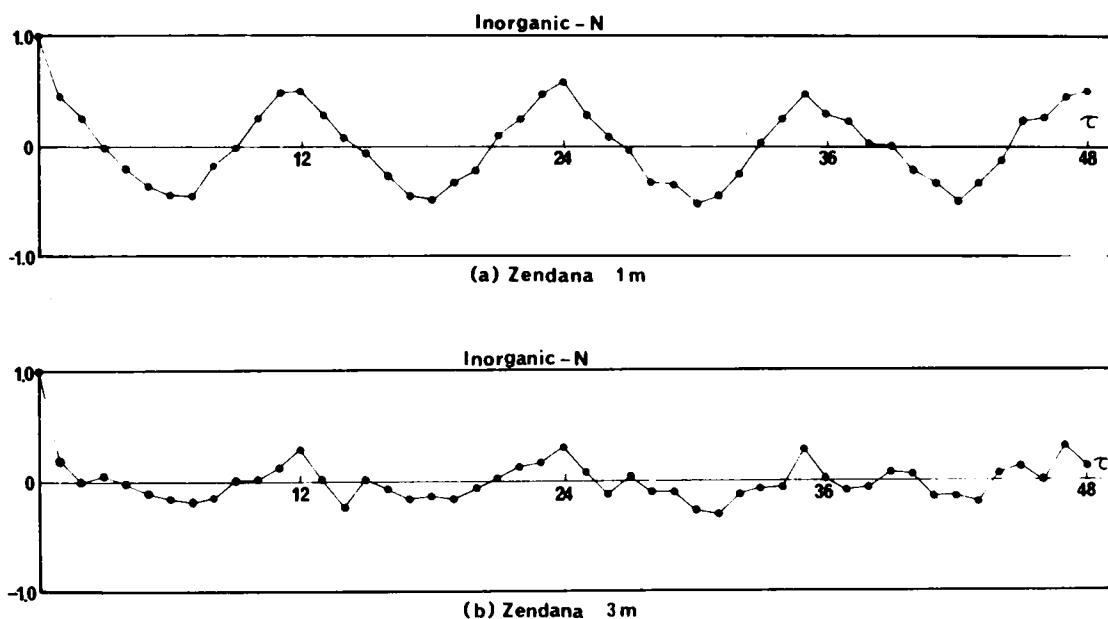


図3-40 無機態窒素コレログラム(膳棚地点)

表 3-9 無機態窒素の時系列解析結果

地 点		取 水 塔 前				膳 棚			
水 深(m)		0	1	3	5	0	1	3	5
m(t)	{切 片 傾 き	0.165	0.161	0.178	0.205	0.150	0.150	0.170	0.197
		0.00217	0.00229	0.00240	0.00275	0.00225	0.00231	0.00248	0.00298
$\sigma(t)$	{切 片 傾 き	0.079	0.077	0.080	0.086	0.079	0.071	0.069	0.069
		0.00083	0.00104	0.00094	0.00086	0.00083	0.00097	0.00105	0.00080
1 年 周期	{振 幅 位相角 分散比	0.919	0.855	0.570	0.111	1.000	0.958	0.578	0.303
		4.966	4.988	5.041	5.575	5.029	5.025	5.235	0.134
		44.4 %	38.4 %	16.4 %	0.8 %	51.5 %	48.3 %	17.6 %	4.6 %
半年 周期	{振 幅 位相角 分散比	0.121	0.135	0.235	0.289	0.067	0.067	0.156	0.290
		2.145	2.372	2.631	3.108	2.199	2.065	2.794	3.036
		0.8 %	1.0 %	2.8 %	5.5 %	0.2 %	0.2 %	1.3 %	4.3 %
4ヵ月 周 期	{振 幅 位相角 分散比	0.212	0.221	0.354	0.215	0.195	0.248	0.372	0.202
		4.003	3.845	3.651	3.947	4.158	4.043	3.968	3.754
		2.4 %	2.6 %	6.3 %	3.0 %	2.0 %	3.2 %	7.3 %	2.1 %
3ヵ月 周 期	{振 幅 位相角 分散比	0.250	0.289	0.412	0.294	0.191	0.197	0.339	0.283
		5.064	5.094	4.964	4.963	4.922	5.010	5.264	5.104
		3.3 %	4.4 %	8.6 %	5.7 %	1.9 %	2.0 %	6.0 %	4.0 %

地 点		郡 界				合 流			
水 深(m)		0	1	3	5	0	1	3	5
m(t)	切 片	0.187	0.185	0.217	0.254	0.206	0.201	0.213	0.262
	傾 き	0.00221	0.00228	0.00249	0.00291	0.00203	0.00225	0.00317	0.00373
$\sigma(t)$	切 片	0.083	0.094	0.080	0.082	0.083	0.0076	0.072	0.075
	傾 き	0.00128	0.00091	0.00119	0.00078	0.00122	0.00140	0.00139	0.00171
1 年 周期	振 幅	0.955	0.955	0.665	0.397	1.010	1.000	0.589	0.507
	位相角	5.127	5.066	5.326	0.197	5.150	5.127	5.417	0.329
	分散比	45.9 %	45.8 %	20.7 %	7.8 %	50.2 %	49.8 %	18.0 %	13.1 %
半年 周期	振 幅	0.073	0.050	0.280	0.454	0.061	0.097	0.223	0.115
	位相角	2.513	2.145	0.997	1.343	1.677	1.813	1.180	0.948
	分散比	0.3 %	0.1 %	3.7 %	10.7 %	0.2 %	0.5 %	2.6 %	0.7 %
4 カ月 周 期	振 幅	0.197	0.259	0.395	0.272	0.199	0.213	0.379	0.119
	位相角	0.431	0.250	0.132	0.512	0.529	0.065	6.248	0.642
	分散比	2.0 %	3.4 %	7.3 %	3.7 %	2.0 %	2.3 %	7.4 %	1.9 %
3 カ月 周 期	振 幅	0.162	0.150	0.335	0.193	0.151	0.126	0.207	0.037
	位相角	4.568	4.334	5.134	4.215	4.526	4.720	4.528	4.620
	分散比	1.3 %	1.1 %	5.3 %	1.9 %	1.1 %	0.8 %	2.2 %	0.1 %

備考：振幅は ppm，位相角は rad. である

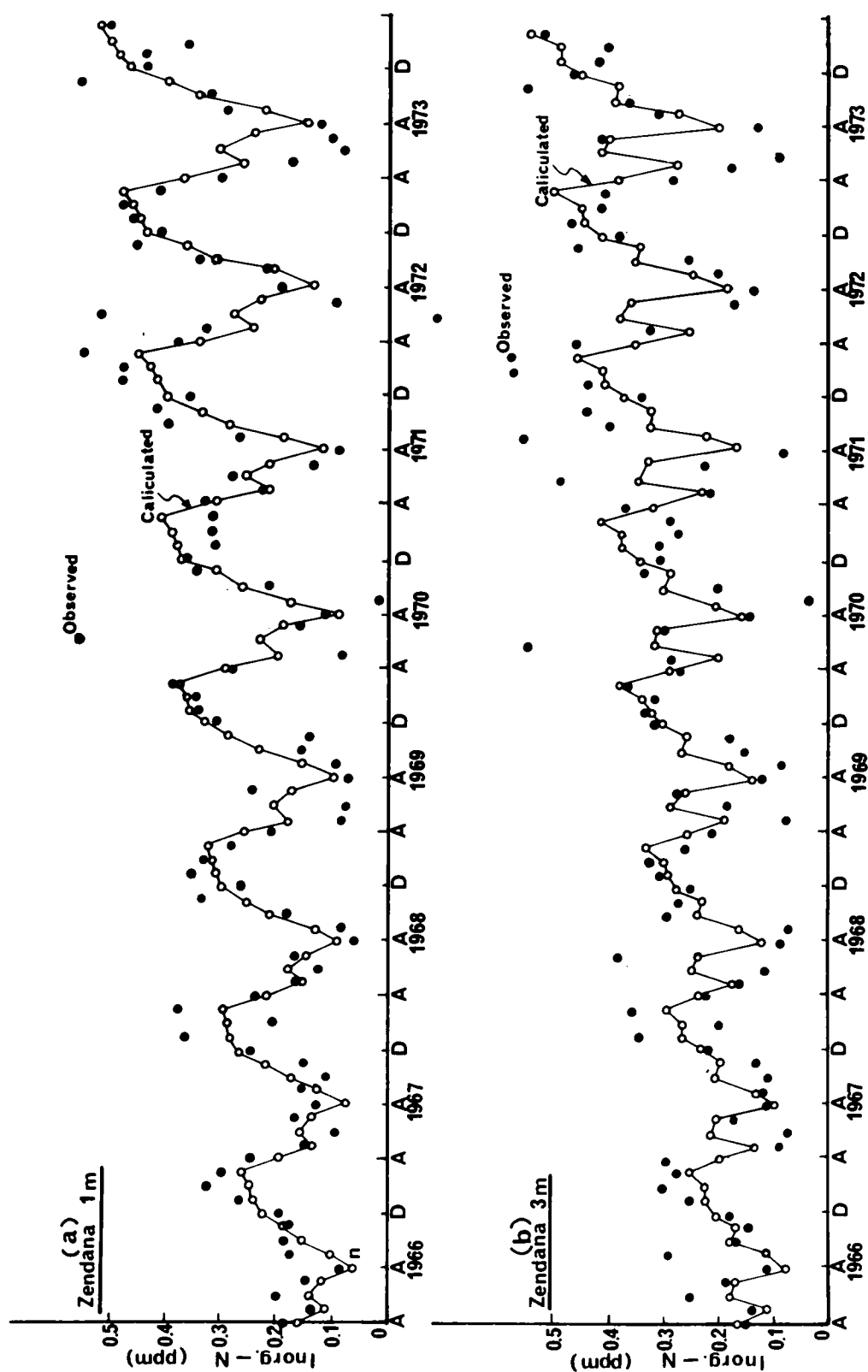


図 3-41 (a), (b) 無機態窒素の経年変化と時系列解析結果 (膳棚地点)

表水層では、植物プランクトンに摂取されると一旦減少する形になり、流入水によってもたらされたものに、深水層から回帰するものが加わる。

このまま、増加が続けば、昭和55年度には平均0.55 ppm、昭和60年度には平均0.69 ppmに達する。

しかし、図3-42に示す相模湖の無機態窒素の経年変化¹⁵⁾と比較するとその増加の速度はかなり小さいものである。

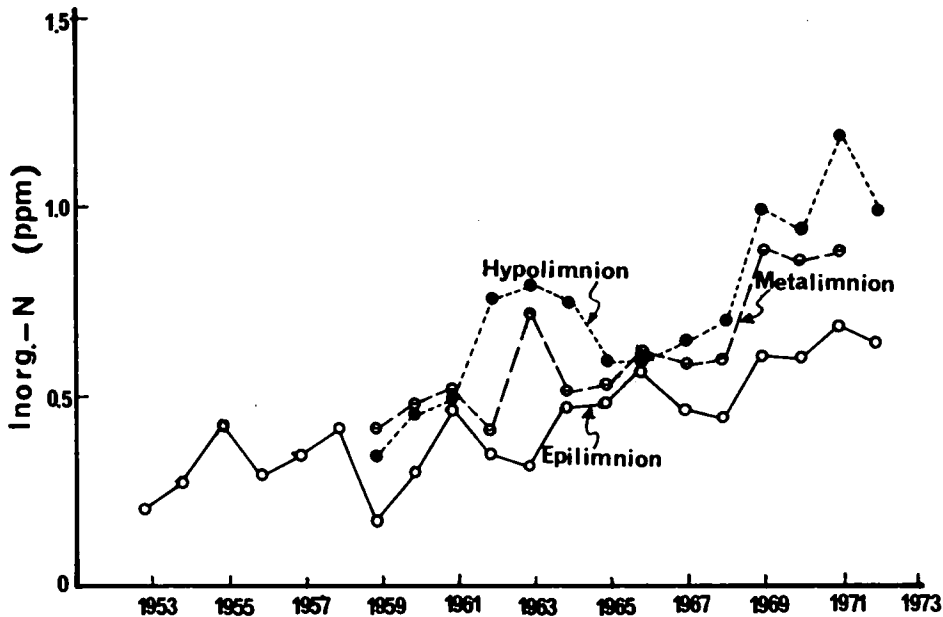


図3-42 相模湖の無機態窒素の経年変化¹⁵⁾

また、無機態窒素と溶存酸素飽和度との関係を示したものが図3-43と図3-44である。栄養塩としての無機態窒素の増減と、植物プランクトンによる生産や微生物の呼吸・分解などの結果としての溶存酸素変化の相関は、富栄養化現象の一面を把握するのに役立つと考えられる。たとえば、表層での無機態窒素の低い値と溶存酸素の過飽和度、底層での無機態窒素の高濃度と溶存酸素の涸渇などの関係が、プロットされた点の散布状態から読みとれる。各年各月の比較により、両者の関係の経年変化は明確に把握されることになる。図3-43は昭和44年度の膳棚地点の1月ごとの変化を示したものである。これより成層期の4月から9月まではほぼ直線上にのる分布状態を示し、成層末期から部分循環期の10月から12月は前出の図3-27のように低下しつつある温度躍層水深の上下に二分された分布となり、循環期の1月から3月までは、水温および水質の一樣分布を表わしている。とくに、成層期のうち6月から9月までは、温度躍層が水表面下4~5 mと15~18 mに2つ存在する3層状態に対して、三分された分布状態を示している。すなわち、この1カ月おきの分布状態は、そのときの流動パターンとよく一致している。図3-44は膳棚地点について成層期8月の $r = -0.9$ と相関度の高い場合の2年おきの経年変化を示したものである。これより、年毎に、回帰直線の切片の増加と勾配の増大が認められる。これは表3-10に示した相関係数および回帰直線表からも明らかである。これは、溶存酸素飽和

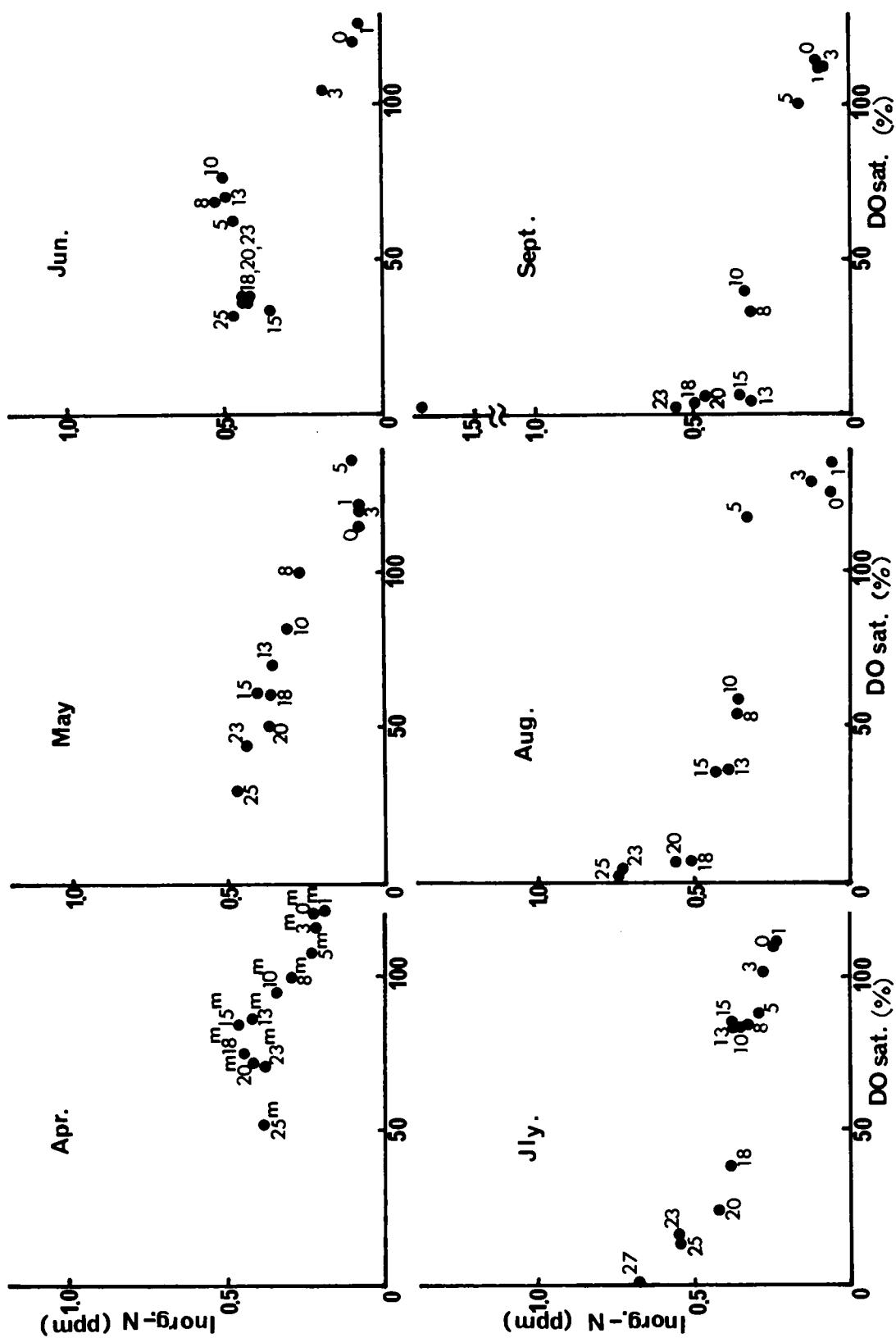


図 3-43 (a) 無機態窒素 — DO飽和度の関係 (磨棚地点, 1969年度)

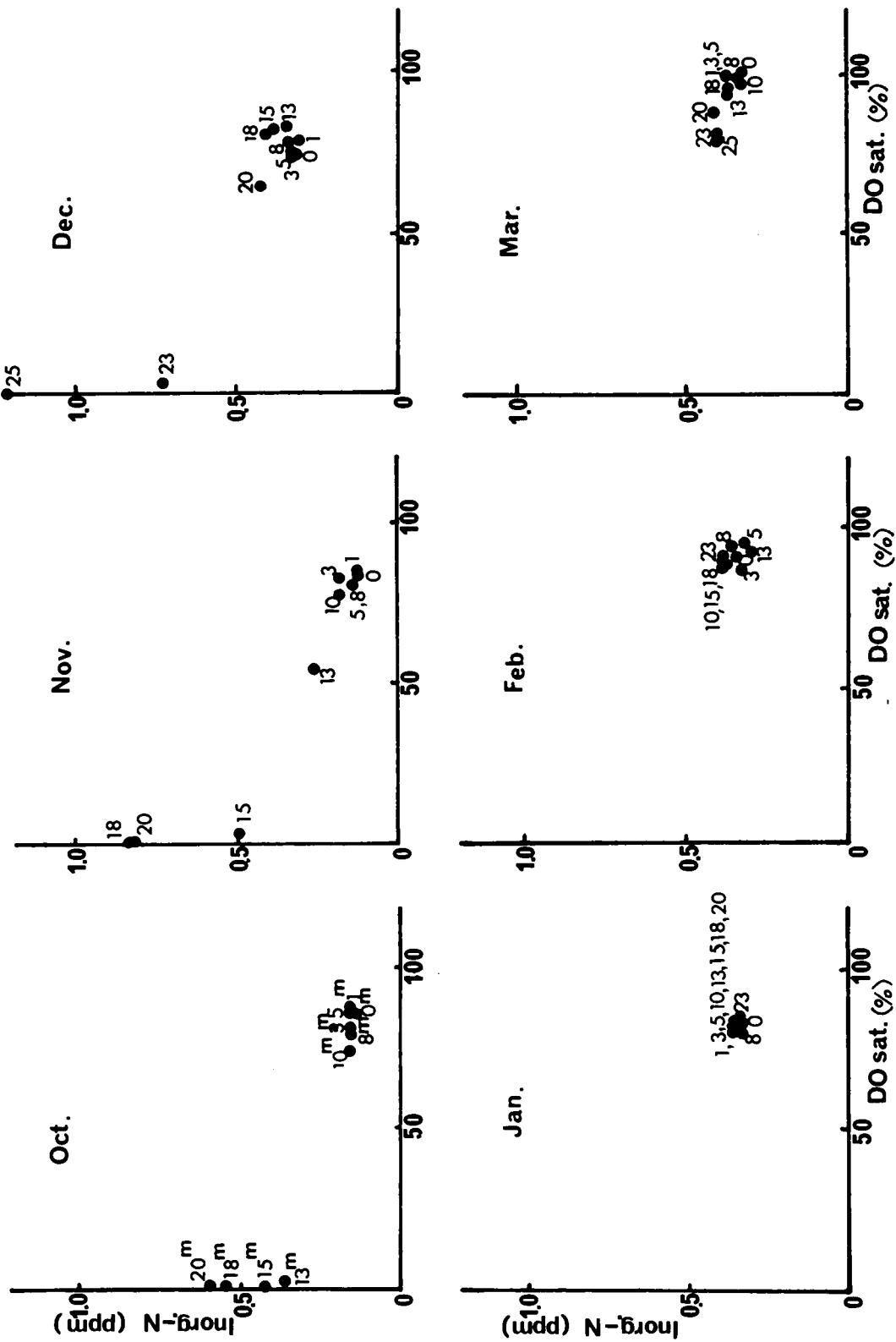


図 3 - 43 (b) 無機態窒素 — DO 飽和度の関係 (潜棚地点, 1969 年度)

度の経年変化が小さいにもかかわらず、無機態窒素の年毎の増加によるものであり、富栄養化傾向を示すものである。

さらに、その分布変化を細かく見ると、無機態窒素濃度の増加は最深部に有する取水塔前で顕著である。また、膳棚および取水塔前の両地点においては、水面下4 m付近の躍層と水深15 m付近の主躍層の間の中層では、年毎に、溶存酸素飽和度の減少と無機態窒素濃度の増加により、負の勾配が大きくなり、急な立ち上がりが見られ、富栄養化過程との関連が認められる。

(2) 過マンガン酸カリウム (KMnO_4) 消費量

KMnO_4 消費量は有機性汚濁の指標の1つであり、千叡貯水池においてもその鉛直分布、季節変化とも特色が見られる。これは、流入水による汚濁度を直接反映しており、経年的な変化を検討する必要がある。したがって、栄養塩の窒素などと同様に、昭和41年度から8年間の1カ月毎のデータによる時系列解析を行ない、経年変化を確認し、それを消去した定常過程について、コレログラム(図3-45)による検討と調和分析(図3-46)とを行なっている。表3-11に示すように平均値、分散、振幅、位相角の水深方向および流下方向の特性から水質の汚濁状態を見ることができる。一般に表水層では夏季に高く冬に低い変化を示し、底層では一年を通して高い値となる。これは、窒素のように水深3 m、5 mでのカバーする変動の割合が悪化することなく、50~60%で1年周期が卓越している。その一例として膳棚地点の水深1.3 mについて、調和分析による関数近似式を示す。ここで、半年周期以下のものについては、その意味があまりないので省略する。

$$C_{\text{KMnO}_4} = (6.045 + 0.00903 \times t) + (1.454 + 0.01249$$

$$\times \left[1.039 \times \cos \left(\frac{\pi}{6} t - 1.970 \right) \right] \quad (3-8)$$

ただし、 $\begin{cases} C_{\text{KMnO}_4} : \text{過マンガン酸カリウム消費量} \\ t : \text{時間(月)}, t=0 \text{を昭和41年4月とする。} \end{cases}$

このピークの現われる時期は植物プランクトンの光合成作用によって影響を受ける溶存酸素飽和度のピーク時期と近い。この

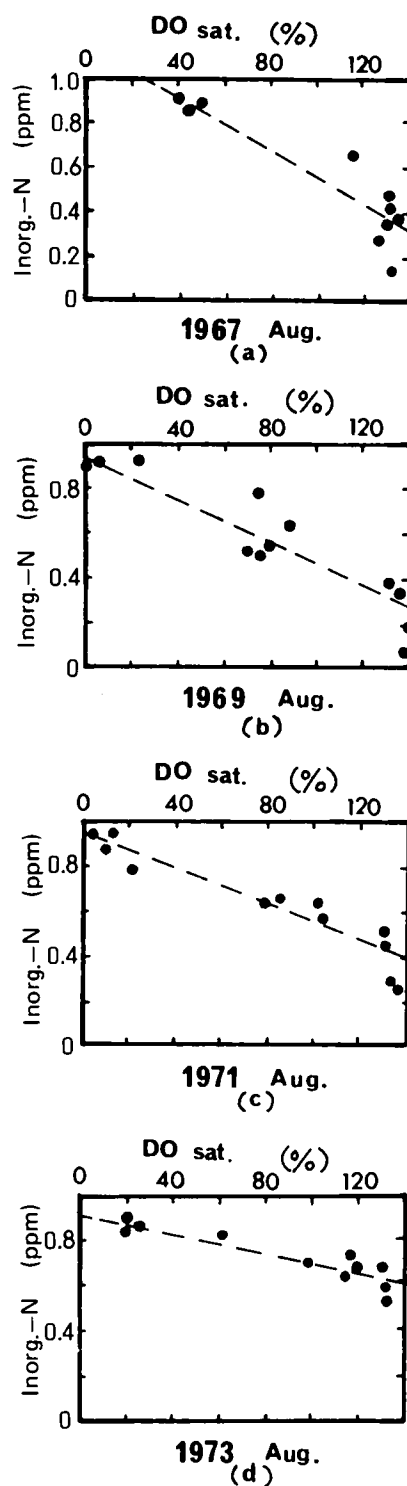


図3-44 無機態窒素 — DO飽和度の関係の経年変化(膳棚地点; 8月)

表 3-10 (a)無機態窒素 — DO飽和度の相関関係(郡界表点)

年度	1967			1968			1969			1970		
	記号	r	b	a	r	b	a	r	b	a	r	b
4月					-0.968	-0.00330	0.607	-0.931	-0.000567	0.930	-0.923	-0.000714
5								-0.975	-0.00379	0.582	-0.832	-0.00235
6					-0.948	-0.00328	0.540	-0.911	-0.00740	1.063	-0.383	-0.0179
7					-0.914	-0.00415	0.688	-0.931	-0.00359	0.632	-0.997	-0.00338
8	-0.991	-0.00303	0.485	-0.982	-0.00243	0.434	-0.941	-0.941	-0.00384	0.619	-0.958	-0.00244
9	-0.986	-0.00252	0.405	-0.982	-0.00518	0.737	-0.943	-0.943	-0.00238	0.411	-0.894	-0.00521
10	0.272	0.00181	-0.0678	-0.961	-0.00479	0.716	-0.976	-0.976	-0.00230	0.308	-0.576	-0.00390
11	-0.969	-0.00893	1.132	0.0794	0.000488	0.258	0	0	0	0.152	-0.728	-0.00838
12	-0.362	-0.00859	1.0646	-0.518	-0.00330	0.602	-0.089	-0.089	-0.00231	0.525	0.0313	0.000574
1	0.110	0.00138	0.211	0.0552	0.000177	0.250	-0.177	-0.177	-0.00636	-0.256	0.0155	0.000198
2	-0.478	-0.000507	0.233	-0.0177	-0.000165	0.384	0.0552	0.0552	0.00115	0.351	0.351	0.00224
3	-0.632	-0.00674	1.027				0.562	0.562	0.00116	0.292	0.121	0.000458

備考 r: 相関係数 a: 回帰直線切片 b: 回帰直線勾配

年度	1971			1972			1973			1974		
	記号	r	b	a	r	b	a	r	b	a	r	b
4月		-0.107	-0.00061	0.465	-0.749	-0.00311	0.972	-0.358	-0.00217	0.603	-0.970	-0.00427
5		-0.916	-0.00289	0.619	-0.898	-0.00393	0.791	-0.813	-0.00365	0.729	-0.966	-0.00468
6		-0.817	-0.00332	0.749	-0.594	-0.00311	1.029	-0.970	-0.00582	0.841	-0.997	-0.00458
7		-0.997	-0.00628	0.917	-0.544	-0.00206	0.433	-0.687	-0.00263	0.667	-0.997	-0.00586
8		-0.940	-0.00440	0.689	-0.970	-0.00196	0.523	-0.761	-0.00462	0.594	-0.723	-0.00266
9	-0.928	-0.00554	0.937	-0.530	-0.00166	0.512	-0.973	-0.973	-0.00662	0.936	0.0441	0.00168
10	-0.520	-0.00186	1.906	-0.676	-0.00195	0.606	-0.872	-0.872	-0.01169	1.369	0.906	0.00525
11	-0.088	-0.00132	0.526	-0.120	-0.000508	0.474	0.390	0.390	0.00988	-0.363	-0.794	-0.00469
12	-0.246	-0.00656	0.901	-0.241	-0.00367	0.786	0.786	0.786	0.0133	-0.784	-0.137	-0.000555
1	-0.244	-0.00143	0.702	-0.531	-0.00348	0.827	0.827	0.827	0.000634	0.321		
2	-0.740	-0.01920	2.382	0.434	0.000562	-0.113	-0.113	-0.113	-0.00218	2.603		
3	-0.370	-0.00360	0.963	-0.215	-0.00068	0.499	0.499	0.499	0.00151	0.412		

備考 r: 相関係数 a: 回帰直線切片 b: 回帰直線勾配

表 3-10 (b) 無機態窒素 — DO 飽和度の相関関係 (膳棚地点)

年度 記号	1966			1967			1968			1969			1970		
	r	b	a	r	b	a	r	b	a	r	b	a	r	b	a
4月	-0.808	-0.00226	0.429	-0.896	-0.00317	0.622	-0.982	-0.00372	0.674	-0.852	-0.00371	0.683	-0.882	-0.00257	0.558
5	-0.922	-0.00209	0.400	-0.561	-0.00264	0.508				-0.962	-0.00409	0.621	-0.739	-0.00208	0.463
6	-0.865	-0.00147	0.403	-0.980	-0.00459	0.595	-0.967	-0.00331	0.516	-0.770	-0.00369	0.627	0.506	0.00072	0.471
7	-0.937	-0.00209	0.427	-0.889	-0.00170	0.402	-0.819	-0.00178	0.449	-0.929	-0.00314	0.591	-0.827	-0.00221	0.575
8	-0.962	-0.00214	0.398	-0.932	-0.00242	0.394	-0.927	-0.00263	0.405	-0.920	-0.00388	0.624	-0.933	-0.00335	0.591
9	-0.754	-0.00174	0.448	-0.954	-0.00269	0.391	-0.929	-0.00326	0.521	-0.540	-0.00634	0.703	-0.859	-0.00364	0.564
10	-0.896	-0.00258	0.447	-0.929	-0.00374	0.483	-0.847	-0.00305	0.548	-0.939	-0.00407	0.488	-0.823	-0.00269	0.632
11	-0.863	-0.00408	0.518	-0.715	-0.00391	0.686	-0.748	-0.00308	0.536	-0.941	-0.00703	0.722	-0.895	-0.00483	0.741
12	-0.933	-0.00464	0.608	-0.827	-0.00379	0.596	-0.891	-0.00450	0.676	-0.919	-0.00800	0.972	-0.853	-0.00127	0.464
1	0.044	0.00066	0.215	-0.301	-0.00696	0.977	-0.939	-0.00659	0.822	-0.420	-0.03234	3.000	-0.837	-0.01205	1.317
2	0.002	0.00001	0.327	-0.880	-0.00986	1.129	-0.934	-0.00282	0.602	0.195	0.00155	0.202	0.402	0.01128	-0.707
3	-0.738	-0.00235	0.526	-0.360	-0.00297	0.040	-0.953	-0.00340	0.624	-0.773	-0.00265	0.622	-0.949	-0.00235	0.540

備考 r: 相関係数 a: 回帰直線切片 b: 回帰直線勾配

年度 記号	1971			1972			1973			1974		
	r	b	a	r	b	a	r	b	a	r	b	a
4月	-0.344	-0.00103	0.503	-0.722	-0.00493	1.008	-0.772	-0.00412	0.760	-0.952	-0.00392	0.899
5	-0.963	-0.00341	0.649	-0.933	-0.00443	0.835	-0.880	-0.00386	0.741	-0.978	-0.00497	0.820
6	-0.856	-0.00390	0.794	-0.628	-0.00323	0.967	-0.954	-0.00903	0.849	-0.927	-0.00650	0.807
7	-0.797	-0.00729	0.992	-0.948	-0.00415	0.655	-0.810	-0.00259	0.606	-0.833	-0.00403	0.730
8	-0.927	-0.00516	0.753	-0.910	-0.00289	0.570	-0.912	-0.00586	0.684	-0.852	-0.00461	0.754
9	-0.871	-0.00574	0.923	-0.689	-0.00208	0.511	-0.894	-0.00506	0.776	-0.742	-0.00500	0.675
10	-0.878	-0.0135	1.404	-0.838	-0.00094	0.467	-0.715	-0.00272	0.617	-0.807	-0.00710	0.819
11	-0.958	-0.00968	1.196	-0.626	-0.00140	0.587	-0.297	-0.0000557	0.614	-0.974	-0.00460	0.699
12	-0.921	-0.01323	1.417	0.606	0.01520	-0.839	-0.0433	-0.000823	0.173	-0.656	-0.00426	0.860
1	-0.418	-0.00452	0.915	-0.438	-0.01010	1.395	0.313	0.00439	0.0197			
2	-0.183	-0.00349	0.834	-0.434	0.00428	0.834	-0.959	-0.0173	2.00246			
3	-0.395	-0.00222	0.836	-0.215	-0.00543	0.957	-0.782	-0.00305	0.801			

備考 r: 相関係数 a: 回帰直線切片 b: 回帰直線勾配

表3-10 (c)無機態窒素 — DO飽和度の相関関係(取水塔前地点)

年度 記号	1966			1967			1968			1969			1970		
	r	a	b	r	a	b	r	a	b	r	a	b	r	a	b
4月	-0.916	-0.00263	0.471	-0.882	0.606	-0.00323	-0.924	0.727	-0.00443	-0.982	0.636	-0.00344	-0.963	-0.00379	0.669
5	-0.920	-0.00328	0.506	-0.917	0.542	-0.00314	-0.904	0.603	-0.00356	-0.904	0.603	-0.00356	-0.906	-0.00239	0.435
6	-0.738	-0.00305	0.540	-0.874	0.709	-0.00541	-0.935	0.603	-0.00409	-0.463	0.458	-0.00179	0.0901	0.000316	0.511
7	-0.810	-0.00222	0.453	-0.710	0.469	-0.00195	-0.722	0.500	-0.00233	-0.689	0.475	-0.00188	-0.779	-0.00210	0.543
8	-0.693	-0.00253	0.361	-0.913	0.404	-0.00244	-0.855	0.503	-0.00349	-0.886	0.600	-0.00409	-0.540	-0.00718	0.736
9	-0.353	-0.00139	0.480	-0.949	0.397	-0.00290	-0.901	0.615	-0.00421	-0.542	0.796	-0.00712	-0.717	-0.00365	0.576
10	-0.925	-0.00253	0.462	-0.569	0.658	-0.00642	-0.858	0.635	-0.00410	-0.685	0.774	-0.00827	-0.518	-0.00429	0.616
11	-0.780	-0.00682	0.477	-0.590	0.943	-0.00727	-0.863	0.838	-0.00690	-0.674	0.979	-0.01166	-0.500	-0.00897	0.975
12	-0.828	-0.00827	0.815	-0.762	0.987	-0.00896	-0.860	0.850	-0.00669	-0.775	1.066	-0.00995	-0.659	-0.00850	1.053
1	-0.898	-0.0116	1.305	0.1863	0.144	0.00284	-0.862	0.937	-0.00805	0.368	-0.183	0.00704	-0.990	-0.0102	1.128
2	-0.831	-0.00276	0.582	-0.873	0.934	-0.00771	-0.980	0.697	-0.00393	-0.868	0.910	-0.00581	0.0433	0.000363	0.268
3	-0.865	-0.00333	0.642	-0.969	0.329	-0.00001	-0.969	0.634	-0.00362	-0.251	0.413	-0.00050	-0.895	-0.00424	0.712

備考 r: 相関係数 a: 回帰直線切片 b: 回帰直線勾配

年度 記号	1971			1972			1973			1974		
	r	a	b	r	a	b	r	a	b	r	a	b
4月	-0.601	-0.00141	0.500	-0.946	0.980	-0.00520	-0.940	0.630	-0.00248	-0.789	0.923	-0.00445
5	-0.833	-0.00583	0.863	-0.942	0.980	-0.00616	-0.799	0.627	-0.00253	-0.978	0.868	-0.00550
6	-0.525	-0.00238	0.716	-0.0477	0.738	-0.000216	-0.999	0.800	-0.00736	-0.846	1.106	-0.0106
7	-0.831	-0.00430	0.721	-0.884	0.577	-0.00296	-0.490	0.972	-0.00655	-0.746	0.917	-0.00672
8	-0.397	-0.01080	1.326	-0.914	0.620	-0.00380	-0.544	0.973	-0.00957	-0.554	1.494	-0.0124
9	-0.467	-0.01330	1.550	-0.864	0.579	-0.00301	-0.510	0.997	-0.00909	-0.554	1.703	-0.0229
10	-0.136	-0.00429	1.004	-0.793	0.502	-0.00196	-0.497	0.772	-0.00530	-0.558	1.689	-0.0204
11	-0.488	-0.02280	1.845	-0.567	0.648	-0.00269	0.390	0.536	0.000518	-0.588	1.829	-0.0181
12	-0.728	-0.02310	2.040	-0.663	0.545	-0.00113	-0.880	1.0529	-0.00855	-0.587	2.102	-0.0235
1	-0.907	-0.00433	0.885	-0.636	0.534	-0.0101	-0.630	1.411	-0.0113			
2	-0.732	-0.00245	0.748	-0.687	0.834	-0.00428	-0.975	1.918	-0.0162			
3	-0.968	-0.00857	1.297	-0.936	0.957	-0.00543	-0.970	1.022	-0.00555			

備考 r: 相関係数 a: 回帰直線切片 b: 回帰直線勾配

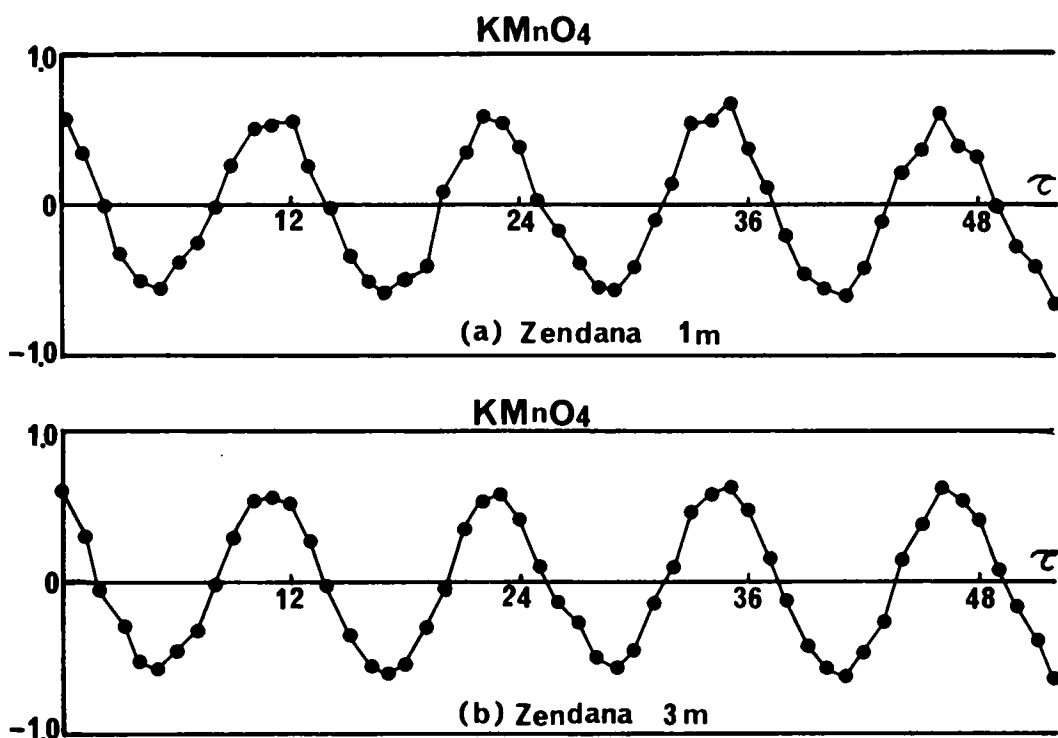


図3-45 KMnO_4 消費量コレログラム（膳棚地点）

まま流入水の汚濁化が続けば、昭和55年度には平均で7.6 ppm，昭和60年度には8.2 ppmとなる。

(1)の無機態窒素および(2)の KMnO_4 消費量は、それぞれ栄養塩および有機汚濁の度合を示す指標として重要であり、その経年変化の程度を時系列解析結果における傾向直線の勾配で表わすことを考える。栄養塩濃度の変化については、富栄養化の進行度合を示す傾向指数として1年当りの濃度変化量を時系列の傾向直線の勾配から求める。同様に、有機性汚濁の進行度合を示す傾向指数として KMnO_4 消費量の1年当りの濃度変化を時系列の傾向直線の勾配から求める。これらを、第5章で述べる流入河川の流入端濃度も含めて表層についてまとめたものが、表3-12と表3-13である。

無機態窒素濃度については、表層ではおよそ0.03 (ppm/年)の変化となり、底層水の0.04 (ppm/年)に比べて少し小さいが、表層躍層の出現水深の5 mでは底層水に近い値となる。流下方向には若干の減少傾向が見られる。 KMnO_4 消費量は0.2531を乗ずることによって COD_{Mn} となるが、 KMnO_4 消費量の変化としては、流下方向および躍層部分を除いて水深方向に減少する傾向が見られる。底層水の変化は膳棚地点での0.011 (ppm/年)のように表層水に比べて小さい。

これらの増加の長期傾向を示す水質因子の変化は、系列平均値だけでなく系列分散も同様に増加の長期傾向を示すものがほとんどであり、経年変化の一時期分だけを取り上げると、全体としてさらに大きな変化を示すこともある。

(3) アルカリ度

一般に、アルカリ度はpHと密接な関係を有する他、水質の汚濁化とともに増加する水質因子である。

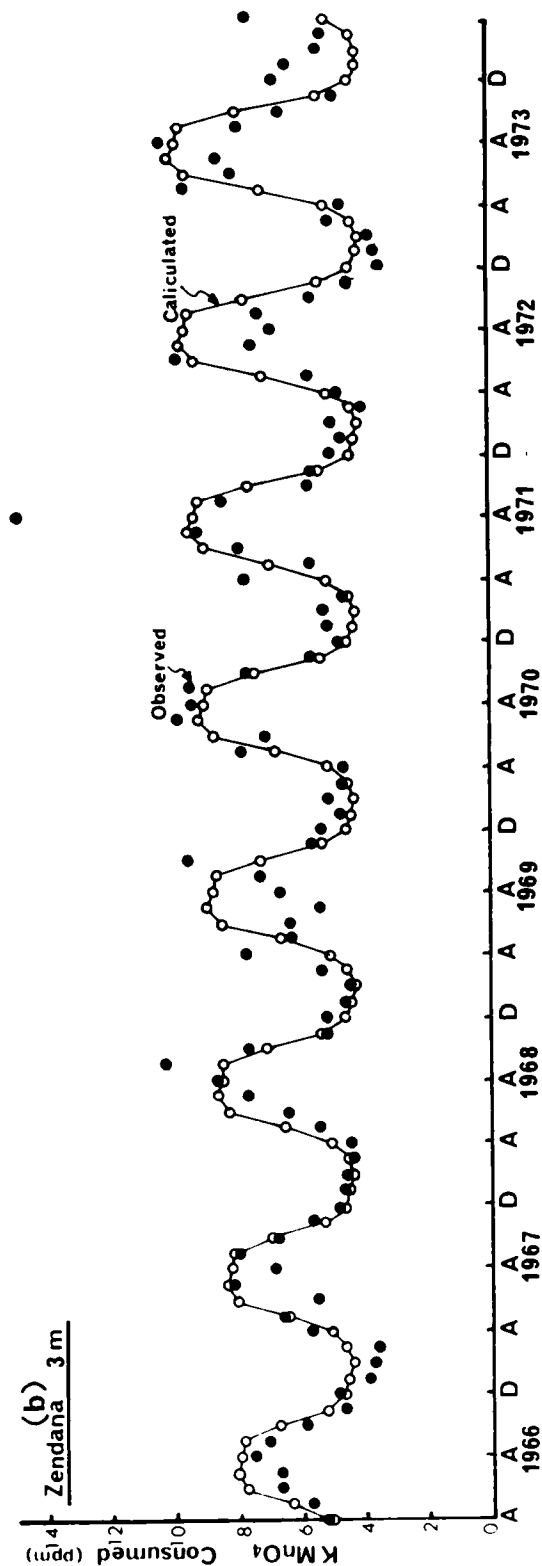
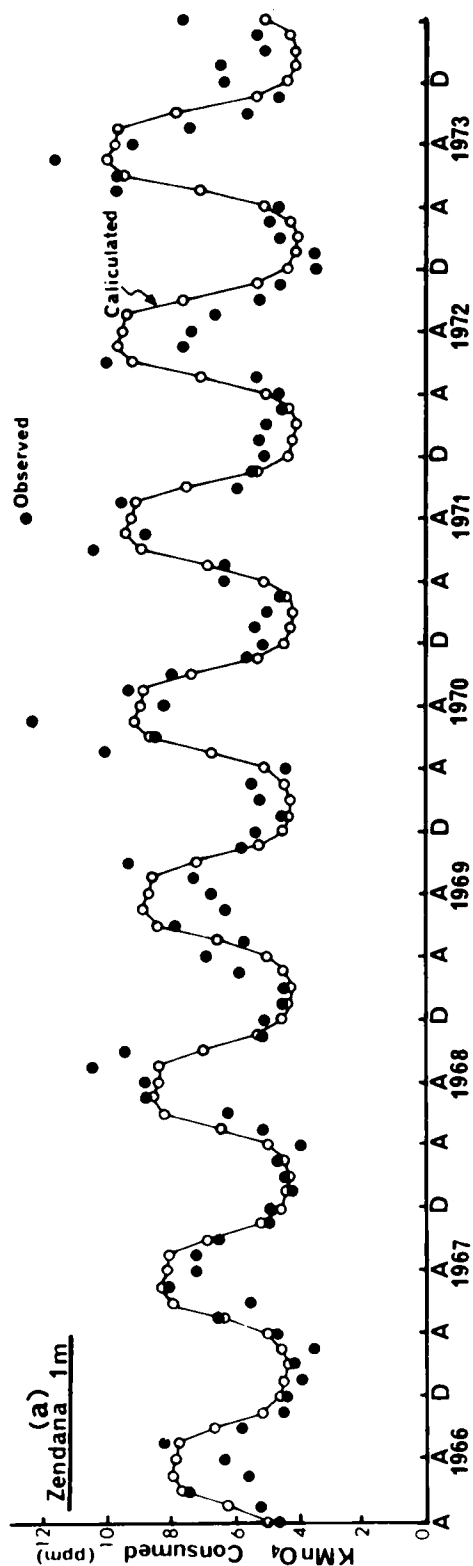


図 3 - 46 (a), (b) KMnO₄消費量の経年変化と時系列解析結果 (膳棚地点)

表3-11 KMnO_4 消費量の時系列解析結果

地 点		取 水 塔				膳 棚			
水 深 (m)		0	1	3	5	0	1	3	5
m(t)	切 片	5.969	6.012	5.944	5.643	6.082	6.045	5.801	5.569
	傾 き	0.00255	0.00370	0.00579	0.00407	0.00749	0.00903	0.0092	0.00749
$\sigma(t)$	切 片	1.542	1.567	1.466	1.243	1.665	1.454	1.302	1.072
	傾 き	0.00549	0.00724	0.00810	0.00646	0.00650	0.01249	0.01244	0.01133
1 年 周 期	振 幅	1.017	1.031	1.045	1.031	1.003	1.039	1.078	1.043
	位相角	1.970	1.916	1.913	1.898	1.954	1.884	1.945	1.974
	分散比	51.9%	53.9%	55.5%	53.6%	51.3%	54.9%	60.2%	55.0%
半 年 周 期	振 幅	0.210	0.193	0.224	0.146	0.243	0.152	0.178	0.100
	位相角	4.117	4.072	4.149	4.252	3.907	3.697	4.523	4.187
	分散比	2.2%	1.9%	2.5%	1.1%	3.0%	1.2%	1.6%	0.5%
4 カ月 周 期	振 幅	0.150	0.183	0.107	0.241	0.165	0.170	0.172	0.201
	位相角	1.801	2.011	1.469	1.614	1.538	2.597	1.246	1.648
	分散比	1.1%	1.7%	0.6%	2.9%	1.4%	1.5%	1.53%	2.1%
3 カ月 周 期	振 幅	0.086	0.174	0.022	0.074	0.086	0.086	0.011	0.095
	位相角	4.597	4.540	3.067	2.692	4.725	4.686	0.764	3.774
	分散比	0.4%	1.5%	0.0%	0.3%	0.4%	0.4%	0.0%	0.5%

地 点		郡 界				合 流			
水 深 (m)		0	1	3	5	0	1	3	5
m(t)	切 片	6.400	6.600	6.326	5.973	6.250	6.472	6.164	5.816
	傾 き	0.01273	0.00999	0.01143	0.00518	0.01319	0.01198	0.01255	0.01481
$\sigma(t)$	切 片	1.638	2.177	1.545	1.060	1.712	1.713	1.217	0.764
	傾 き	0.01935	0.00201	0.01094	0.01454	0.01757	0.01602	0.02070	0.02896
1 年 周 期	振 幅	0.952	1.061	1.073	0.962	1.065	1.135	1.103	1.089
	位相角	2.002	1.932	1.976	2.016	2.000	1.949	2.100	2.180
	分散比	46.2 %	56.5 %	59.9 %	39.3 %	58.4 %	63.6 %	58.7 %	50.3 %
半 年 周 期	振 幅	0.147	0.103	0.118	0.036	0.066	0.048	0.123	0.193
	位相角	1.968	1.919	3.300	3.037	0.688	6.088	4.090	3.726
	分散比	1.1 %	0.5 %	0.7 %	0.1 %	0.2 %	0.1 %	0.7 %	1.6 %
4 カ月 周 期	振 幅	0.119	0.113	0.152	0.180	0.118	0.090	0.237	0.190
	位相角	3.373	4.455	3.662	4.069	2.734	3.056	2.829	3.246
	分散比	0.7 %	0.6 %	1.2 %	1.4 %	0.7 %	0.4 %	2.7 %	1.5 %
3 カ月 周 期	振 幅	0.110	0.147	0.034	0.153	0.197	0.167	0.087	0.217
	位相角	6.161	5.681	2.803	4.256	5.267	5.376	4.701	4.714
	分散比	0.6 %	1.1 %	0.1 %	1.0 %	2.0 %	1.4 %	0.4 %	2.0 %

備考：振幅は ppm，位相角は rad. である

表 3-12 無機態窒素濃度変化の傾向指数

(1966~1974)

水深 地点	0 m	1 m	3 m	5 m	表層平均
流入水	波豆川：0.0263		羽束川：0.0589		
合流点	0.0244	0.0270	0.0380	0.0448	0.0335
郡界地点	0.0265	0.0274	0.0299	0.0349	0.0297
膳棚地点	0.0270	0.0277	0.0298	0.0358	0.0301
取水塔前地点 (堰堤前)	0.0260	0.0275	0.0288	0.0330	0.0288
水深平均	0.0260	0.0274	0.0316	0.0371	0.0305

(単位：ppm/year)

表 3-13 COD_{Mn} 変化の傾向指数

(1966~1974)

水深 地点	0 m	1 m	3 m	5 m	表層平均
流入水	波豆川：0.122		羽束川：0.0215		
合流点	0.0401	0.0364	0.0381	0.0450	0.0399
郡界地点	0.0387	0.0303	0.0347	0.0157	0.0299
膳棚地点	0.0228	0.0274	0.0279	0.0228	0.0252
取水塔前地点 (堰堤前)	0.0077	0.0112	0.0176	0.0124	0.0122
水深平均	0.0273	0.0264	0.0296	0.0240	0.0268

(単位：ppm/year)

これについても、昭和41年度から8年間の1カ月毎のデータについて(1)、(2)と同様の時系列解析を行なっている。その経年変化を消去したコレログラムの一例として図3-47に膳棚地点の水深1,3mのものを示し、調和分析の結果を図3-48に示す。これからもわかるように、経年変化の傾きは小さいものであり、秋季にピークの現われる季節変化をする。

アルカリ度についても、調和分析による関数近似式の例を表3-14に示すが、卓越する一年周期変動のカバーする割合は40%前後で、膳棚地点の水深1mについては次式となる。

$$C_{\text{Alk.}} = (13.33 + 0.05657 \times t) + (3.215 + 0.00444 \times t) \times \left[\cos \left(\frac{\pi}{6} t - 4.118 \right) \right] \quad (3-9)$$

ただし、 $\begin{cases} C_{\text{Alk.}} : \text{アルカリ度 (mg/l)} \\ t : \text{時間 (月)}, t=0 \text{ を昭和41年4月とする。} \end{cases}$

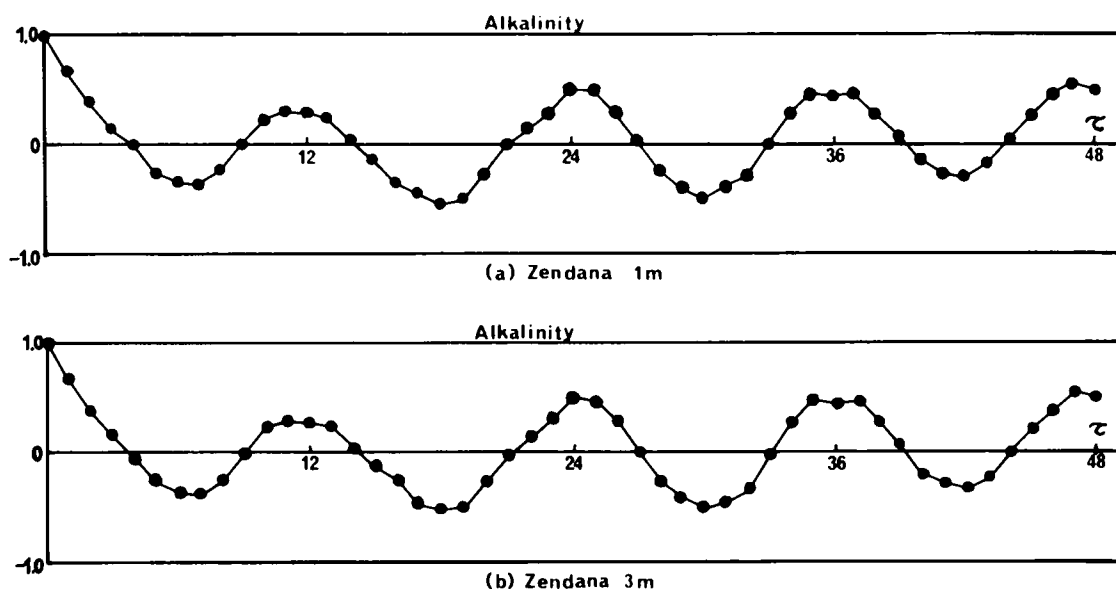


図3-47 アルカリ度コレログラム（膳棚地点）

(4) リン酸イオン (PO_4^{3-})

リン酸イオンに関しては、過去のデータの蓄積がなく、経年変化を統計的に確認することはできないが、その変化は、栄養塩として無機態窒素と同様の挙動をとっているものと考えられる。したがって、著者らの11回の測定データより1年をサイクルとする季節変化のパターンを把握することにとどまっている。

まず、11回の観測値のうち、貯水池の状態および測定間隔を考慮して、昭和49年の9回の測定値から季節パターンを求めた。ただし、測定値の欠けている2月、3月、12月は、内挿および外挿法で推定した値を補うほか、水深によっては測定値のバラツキが大きいため、植物プランクトンとの関係が強い表水層の0～5 mの6個のデータの平均値について解析を行なった。各地点の変化から取水塔前、膳棚、郡界、長瀬の4地点の表層平均の場合について図3-49に示す。ただし、合流点は水深0 mの測定値1つの変化パターンであった。これより梅雨期の大きなピーク、秋季の循環後の小さなピークが認められ、その調和分析の結果を表3-15に示し、関数近似の一例として、前述の4地点平均の場合について示すと次式になる。半年周期が1年周期よりも変動をカバーする比率が大きく、4カ月周期も無視しえない。

$$\begin{aligned} C_{\text{PO}_4^{3-}} = & 0.029 + 0.015 \times \cos\left(\frac{\pi}{6}t - 1.495\right) + 0.019 \times \cos\left(\frac{\pi}{3}t - 3.202\right) + 0.010 \\ & \times \cos\left(\frac{\pi}{2}t - 4.747\right) + 0.007 \times \cos\left(\frac{2\pi}{3}t - 6.194\right) \end{aligned} \quad (3-10)$$

ただし、 $\begin{cases} C_{\text{PO}_4^{3-}} : \text{PO}_4^{3-} \text{濃度 (mg/ℓ)} \\ t : \text{時間(月), } t=0 \text{を4月とする。} \end{cases}$

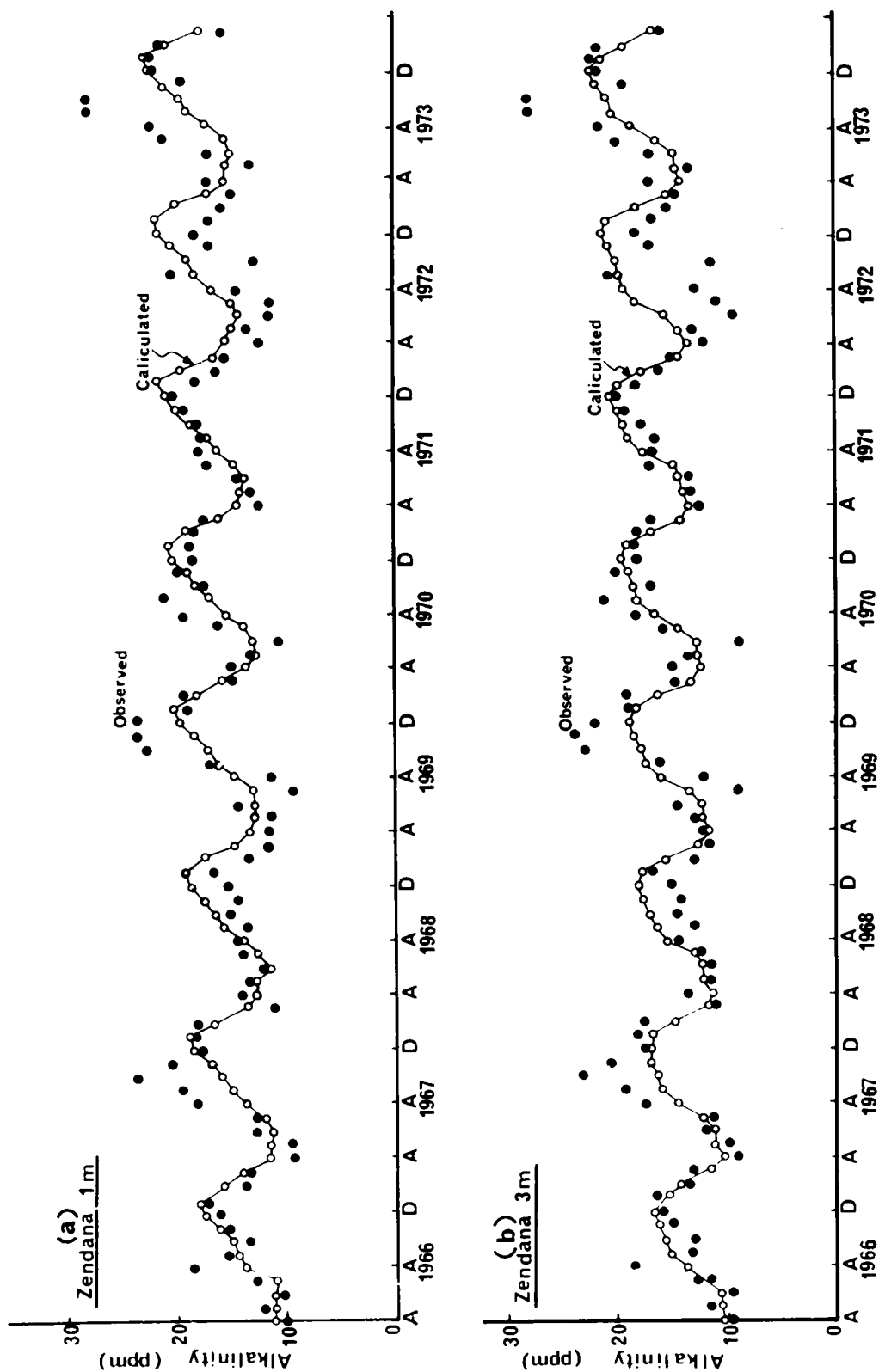


図 3-48 (a), (b) アルカリ度の経年変化と時系列解析結果 (膳棚地点)

表3-14 アルカリ度の時系列解析結果(表層)

地 点		取水塔前		膳 棚		郡 界		合 流	
水 深(m)		1	3	1	3	1	3	1	3
m(t)	切 片	13.18	13.01	13.33	13.20	14.90	14.87	14.90	14.82
	傾 き	0.05835	0.06036	0.05657	0.05549	0.04702	0.04579	0.05801	0.06297
$\sigma(t)$	切 片	3.38	3.48	3.22	3.15	3.02	3.10	2.84	3.02
	傾 き	0.00498	0.00536	0.00443	0.00806	0.00893	0.01147	0.02080	0.02469
1 年 周 期	振 幅	0.981	0.956	0.978	0.974	1.022	0.975	1.077	1.024
	位相角	3.743	3.789	4.118	3.668	5.393	5.461	5.174	5.114
	分散比	45.4%	43.0%	43.9%	44.2%	42.0%	39.1%	44.7%	40.8%
半 年 周 期	振 幅	0.139	0.103	0.163	0.144	0.151	0.372	0.296	0.182
	位相角	0.453	3.976	3.305	3.286	4.742	4.510	4.358	4.504
	分散比	0.9%	0.5%	1.2%	1.0%	0.9%	5.7%	3.4%	1.3%
4ヵ月 周 期	振 幅	0.124	0.115	0.142	0.133	0.204	0.218	0.348	0.371
	位相角	2.045	2.097	1.504	1.376	5.515	5.177	5.137	4.935
	分散比	0.7%	0.6%	0.9%	0.8%	1.7%	2.0%	4.7%	5.4%
3ヵ月 周 期	振 幅	0.088	0.079	0.034	0.062	0.093	0.138	0.188	0.271
	位相角	3.823	3.688	2.475	2.008	4.204	4.406	3.646	3.634
	分散比	0.4%	0.3%	0.2%	2.0%	0.3%	0.8%	1.4%	2.9%

備考：振幅は ppm，位相角は rad. である

図3-49 PO₄³⁻の季節変化(1974年度; 取水塔前, 膳棚, 郡界, 長瀬の4地点の0~5m平均)

表3-15 PO_4^{3-} の調和分析結果 (1974年度, 表層)

地 点	取水塔前	膳 棚	郡 界	長 瀬	合 流	4地点平均	
平 均 值	0.033	0.024	0.028	0.030	0.024	0.029	
分 散	0.0005769	0.0002557	0.0005348	0.0003805	0.0002601	0.0003756	
1 年 周 期	振 幅	0.020	0.009	0.018	0.014	0.010	0.015
	位相角	1.295	- 1.382	1.492	1.637	0.572	1.495
	分散比	34.7 %	15.8 %	30.3 %	25.8 %	19.2 %	30.0 %
半 年 周 期	振 幅	0.024	0.012	0.024	0.018	0.013	0.019
	位相角	2.919	3.551	3.240	3.253	3.209	3.202
	分散比	49.9 %	28.2 %	53.9 %	42.6 %	32.5 %	48.1 %
4カ月 周 期	振 幅	0.012	0.011	0.008	0.010	0.005	0.010
	位相角	4.404	5.274	4.527	4.730	4.401	4.747
	分散比	12.5 %	23.7 %	6.0 %	13.1 %	4.8 %	13.3 %
3カ月 周 期	振 幅	0.005	0.009	0.007	0.010	0.009	0.007
	位相角	5.407	0.409	5.539	0.267	5.595	6.194
	分散比	2.2 %	15.8 %	4.6 %	13.1 %	15.6 %	6.5 %

備考：振幅は ppm, 位相角は rad. である

(5) TOC

TOC の測定データは著者らの観測によるものであり, 過去のデータはないため経年変化を確認することができないが, その水質指標としての性質の類似性から, 過マンガン酸カリウム消費量と同様の傾向にあると考えられる。この TOC についても, PO_4^{3-} と同様に貯水池の状態および測定間隔を考慮して, 昭和49年の9回の観測値から季節パターンを求めた。なお, 測定値の欠けている2月, 3月, 12月は, 内挿および外挿法で推定した値を補う一方, 水深による測定値の変動の影響を押さえるために, 変動が明確な表水層の水深0~5mについて6個の測定値の平均に対して調和分析を行なっている。

各地点の変化から取水塔前, 膳棚, 郡界, 長瀬の4地点の表層平均についてその季節変化パターンを示したものが図3-50であり, それぞれの調和分析結果は表3-16にまとめてある。この図より, 梅雨期の7月に大きなピーク, 冬季の循環後のピークの出現が目立っている。調和分析による関数近似の例として, 前述の4地点平均の場合は次式で与えられる。この場合は, 半年周期が77.5%の変動をカバーして支配的であり, 1年周期は11.6%の変化をカバーするだけにとどまっており, 他は無視しうる程度である。

$$C_{\text{TOC}} = 2.46 + 0.563 \times \cos\left(\frac{\pi}{6}t - 3.303\right) + 1.457 \times \cos\left(\frac{\pi}{3}t - 3.018\right) \quad (3-11)$$

ただし, $\begin{cases} C_{\text{TOC}} : \text{TOC 濃度 (mg/l)} \\ t : \text{時間 (月)}, t=0 \text{ を 4 月 とする。} \end{cases}$

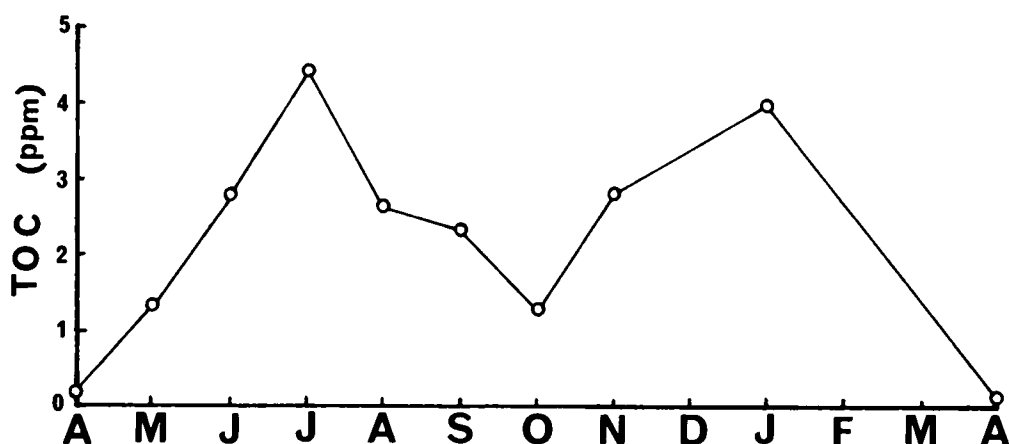


図3-50 TOCの季節変化(1974年度;取水塔前,膳棚,郡界,長瀬の4地点の0~5m平均)

表3-16 TOC調和分析結果(1974年度;表層)

地 点	取水塔前	膳 棚	郡 界	長 瀬	合 流	4地点平均	
平 均 値	2.64	2.29	2.62	2.36	1.77	2.46	
分 散	2.932	0.726	1.710	1.483	1.231	1.369	
1 年 周 期	振 幅	0.720	0.564	0.787	0.330	0.798	0.563
	位相角	2.882	3.054	3.843	3.534	2.467	3.303
	分散比	8.8%	21.9%	18.1%	3.7%	25.9%	11.6%
半 年 周 期	振 幅	1.746	0.827	1.611	1.539	0.670	1.457
	位相角	3.448	2.959	2.908	2.715	2.969	3.018
	分散比	52.0%	47.1%	75.9%	79.8%	18.2%	77.5%
4 カ月 周 期	振 幅	0.365	0.135	0.331	0.343	0.457	0.184
	位相角	4.905	0.997	3.924	3.951	4.763	4.322
	分散比	2.3%	1.3%	3.2%	4.0%	8.5%	1.2%
3 カ月 周 期	振 幅	0.562	0.262	0.137	0.337	0.608	0.070
	位相角	6.013	1.929	4.052	3.867	0.990	5.277
	分散比	5.4%	4.7%	0.5%	3.8%	15.0%	0.2%

備考:振幅は ppm, 位相角は rad. である

(6) 底層の水質変化 (NH_4^+-N , NO_3^--N , 全 Mn, DO)

底層における水質変化で注目されるものは、アンモニア態窒素、硝酸態窒素などの無機塩類と、マンガンの金属類である。底層での環境条件としては、一年を通して水温変化の幅は小さく低温が保たれるほか、溶存酸素が循環によって一旦補給された後は、利用されて減少するために不足がちで、還元

状態となることが多い。したがって、溶存酸素の増減の影響を受けるものが多い。その最深部での溶存酸素量には経年変化は認められず、膳棚地点では1年周期が全体の変動の72.1%をカバーして（図3-51参照）、次式で表わされる周年変化を見せる。時系列解析結果の表3-15より半年周期のカバーする割合は6.1%と比較的大きいが、あまり意味がないので省く。

$$C_{DO} = 4.047 + 4.998 \times \cos\left(\frac{\pi}{6}t - 5.635\right) \quad (3-12)$$

ただし、 $\begin{cases} C_{DO} : \text{溶存酸素濃度 (mg/l)} \\ t : \text{時間(月), } t=0 \text{ を 4月とする。} \end{cases}$

この溶存酸素量の変動下で、全MnはF検定によってその経年変化は認められず、第3節でその最深部の変化を述べているのでここでは省略する。

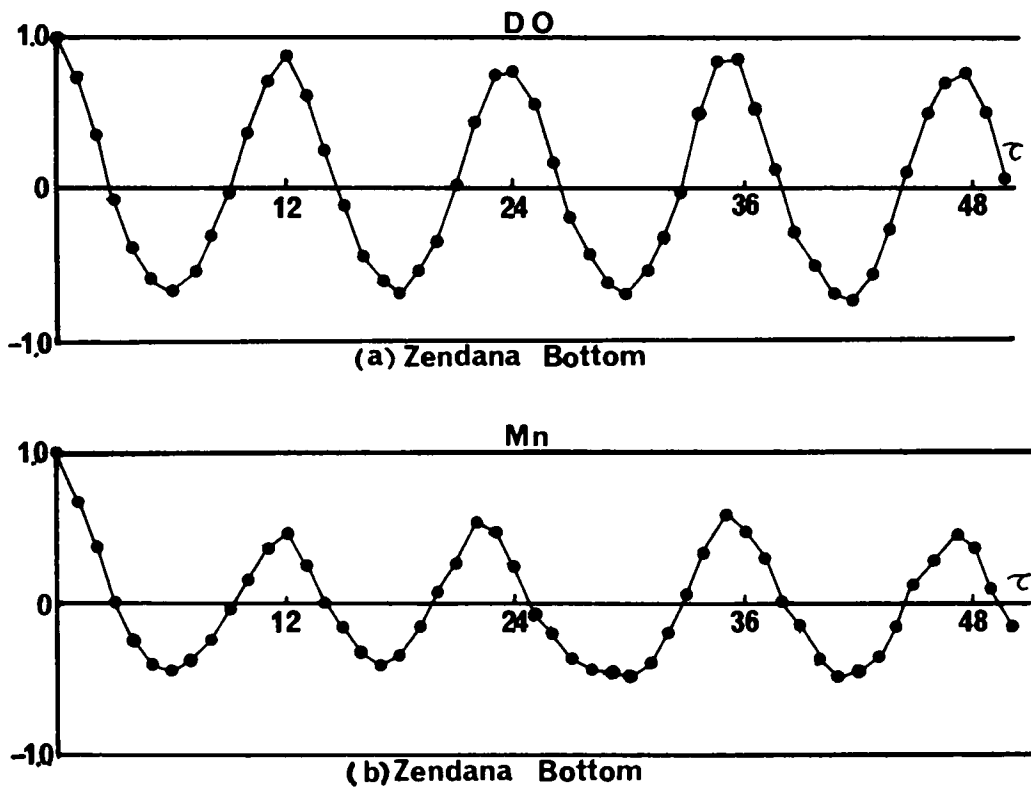


図3-51 底層のDOおよび全Mnのコレログラム（膳棚地点）

これに対して、アンモニア態窒素および硝酸態窒素には経年変化が認められる（図3-17参照）。すなわち、溶存酸素量の存在下あるいは過飽和の状態下によって異なり、アンモニア態窒素は、溶存酸素の欠乏、すなわち、還元状態下でピークになり、循環による上下の混合後は溶存酸素量も多く、減少する季節変化を繰り返しながら、全体として増加の傾向を見せている（図3-53、図3-54参照）。膳棚地点の最深部の NH_4^+-N の調和分析による関数近似は次式で表わされ、1年周期が変動全体の38.2%をカバーし、半年周期は6.8%、4カ月周期は7.3%と無視できない。

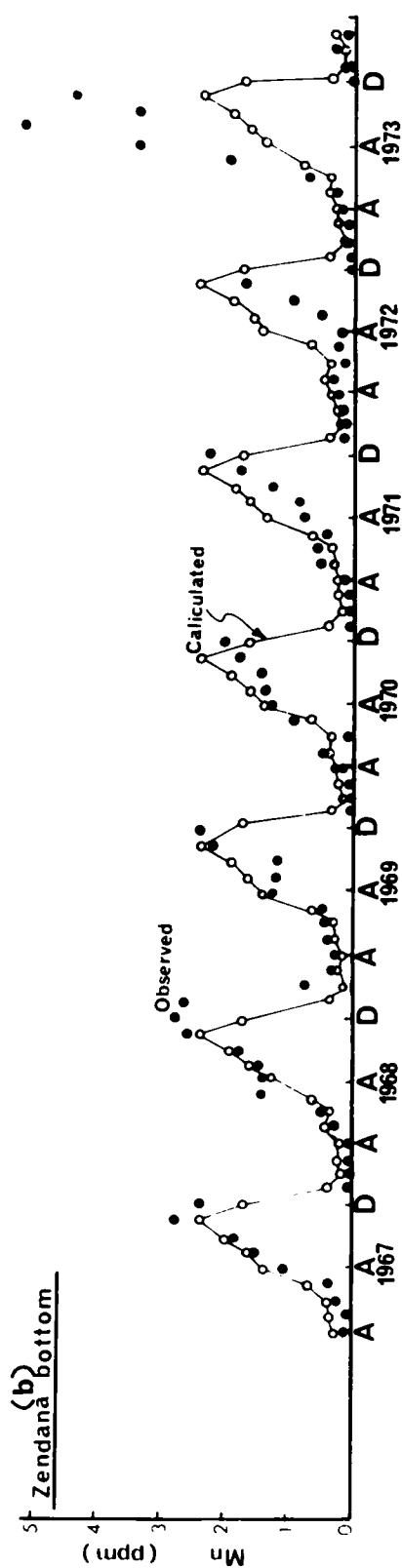
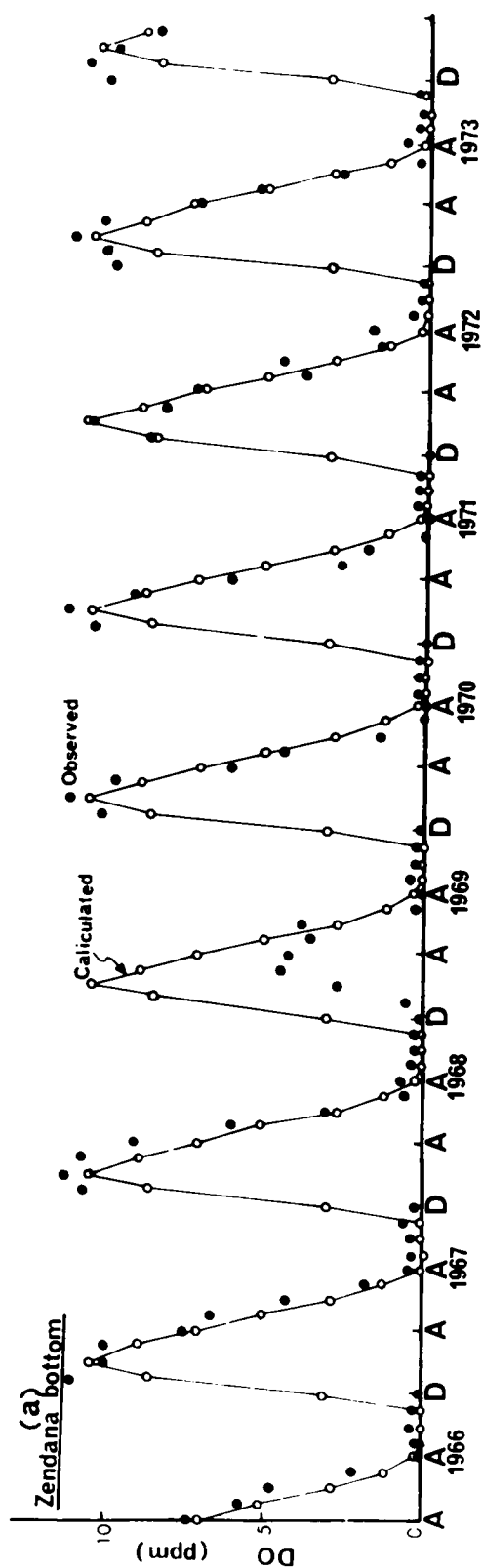
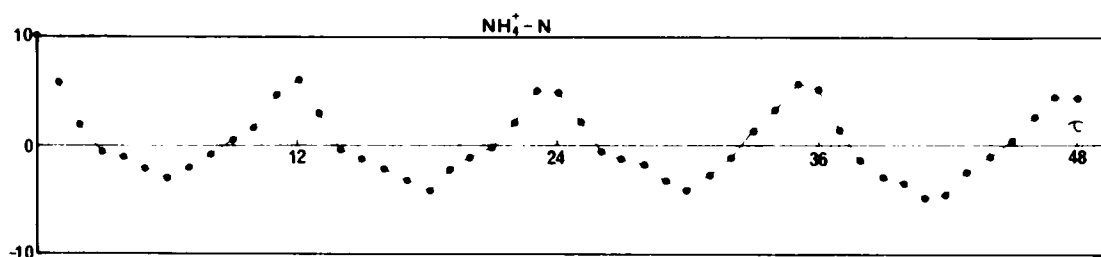


図 3-52 (a), (b)底層の DO および全 Mn 濃度の経年変化と時系列解析結果 (膳棚地点)

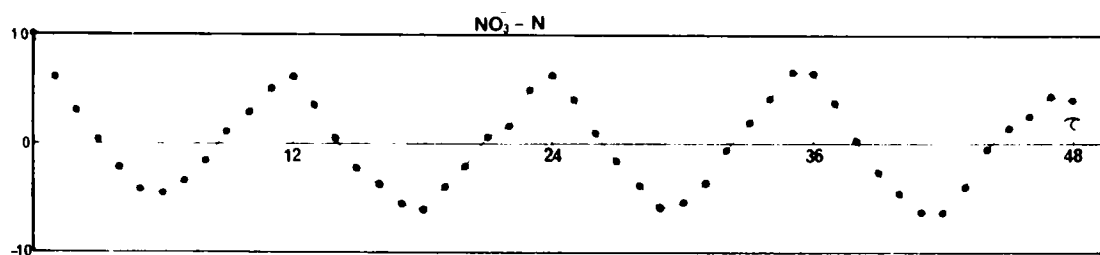
表 3-17 底層水質の時系列解析結果（膳棚地点）

水 質 因 子	DO	Mn	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$
$m(t)$ {	切 片	4.047	0.958	0.197
	傾 き	0	0	0.00145
$\sigma(t)$ {	切 片	1.0	1.0	0.094
	傾 き	0	0	0.00088
系 列 {	平 均	4.047	0.958	0.004
	分 散	17.313	1.159	1.001
1 年 周 期 {	振 幅	4.998	1.007	0.885
	位相角	5.635	3.143	0.440
	分散比	72.1%	43.7%	50.6%
半 年 周 期 {	振 幅	1.458	0.354	0.237
	位相角	4.261	0.652	2.845
	分散比	6.1%	5.4%	2.8%
4 カ月 周 期 {	振 幅	0.810	0.232	0.343
	位相角	2.256	5.528	2.918
	分散比	1.9%	2.3%	5.9%
3 カ月 周 期 {	振 幅	0.321	0.166	0.167
	位相角	0.183	2.877	5.212
	分散比	0.3%	1.2%	1.4%

備考：振幅は ppm，位相角は rad. である



(a) Zendana bottom



(b) Zendana bottom

図 3-53 底層の $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ および $\text{NO}_3^- - \text{N}$ のコレログラム

$$C_{\text{NH}_4^+-\text{N}} = (0.240 + 0.00217 \times t) + (0.210 + 0.00320 \times t) \times \left[0.885 \times \cos\left(\frac{\pi}{6} t - 3.371\right) + 0.373 \times \cos\left(\frac{\pi}{3} t - 1.318\right) + 0.387 \times \cos\left(\frac{2\pi}{3} t - 5.291\right) \right] \quad (3-13)$$

ただし、 $\begin{cases} C_{\text{NH}_4^+-\text{N}} : \text{NH}_4^+-\text{N} \text{ 濃度 (mg/ℓ)} \\ t : \text{時間(月)}, t=0 \text{ を昭和41年4月とする。} \end{cases}$

そして、硝酸態窒素はその性質上、アンモニア態窒素の増減とは逆の対応を見せ、溶存酸素の多い、循環による混合後にピークが出現し、溶存酸素欠乏時には減少する季節変化を示しながら、全体的に増加傾向にある。その調和分析による関数近似の例を、膳棚地点の最深部について表わしたものが次式である。1年周期がカバーする変動の割合は50.6%，4カ月周期は5.9%と少し大きい。

$$C_{\text{NO}_3^--\text{N}} = (0.197 + 0.00145 \times t) + (0.094 + 0.00088 \times t) \times \left[1.007 \times \cos\left(\frac{\pi}{6} t - 0.440\right) \right] \quad (3-14)$$

ただし、 $\begin{cases} C_{\text{NO}_3^--\text{N}} : \text{NO}_3^--\text{N} \text{ 濃度 (mg/ℓ)} \\ t : \text{時間(月)}, t=0 \text{ を昭和42年4月とする。} \end{cases}$

また、亜硝酸態窒素は、量的には少いが、深水層の下部において大きくなる。とくに、 NH_4^+-N が最大になる最深部の数メートル上方で最高になり、全体的な変化の傾向は NH_4^+-N に似ている。

以上の無機態窒素の底層での挙動は、底質と水体との間の物質移動として重要であり、その季節変化は栄養塩の回帰、さらに経年変化は栄養塩の蓄積と関係し、いずれも富栄養化過程の判断資料となる。そして、無機態窒素の硝酸態、亜硝酸態、アンモニア態、および窒素ガスを含めた相互間の変化は、溶存酸素量に左右され、酸化・還元反応が硝化・脱窒という現象で現われることになる。

第5節 結 語

この章では、千叡貯水池の水質変化特性を神戸市水道局および著者らの観測値によって、1年をサイクルとする周期的な季節変化と、富栄養化過程や水質汚濁化現象を含む長期傾向としての経年変化とに分けて、統計的解析による変化パターンの定式化を試みた。

著者らの観測は、昭和48年10月から昭和49年11月までの約13カ月と、水質変化の1年のサイクルを把え、かつ、昭和49年4月から11月までは約30日とほぼ等間隔に生物の生産活動の活発な時期をおさえている。また、観測は水深1mおきの採水測定により、水質分布から流動状態の把握もできうようにし、水温、DO、SS、濁度、電導度の他に、 PO_4^{3-} 、TOC、クロロフィルaおよびけい光度の測定を行ない、鉛直および流下方向特性の周年変化を把えた。

流速の観測はトレーサ実験により、合流点付近における流動状態と平均流速の関係をある程度把握し、出水に伴う濁水をトレーサーとした濁度と導電率の鉛直分布、および滞留時間特性について検討を行った。

水質観測値の統計解析では、神戸市水道局の過去8年間の月別観測値を中心に、各地点各水深の年平均値の増減によって長期傾向を確認し、コログラムによって周年変化を見た。その上、調和分析による水

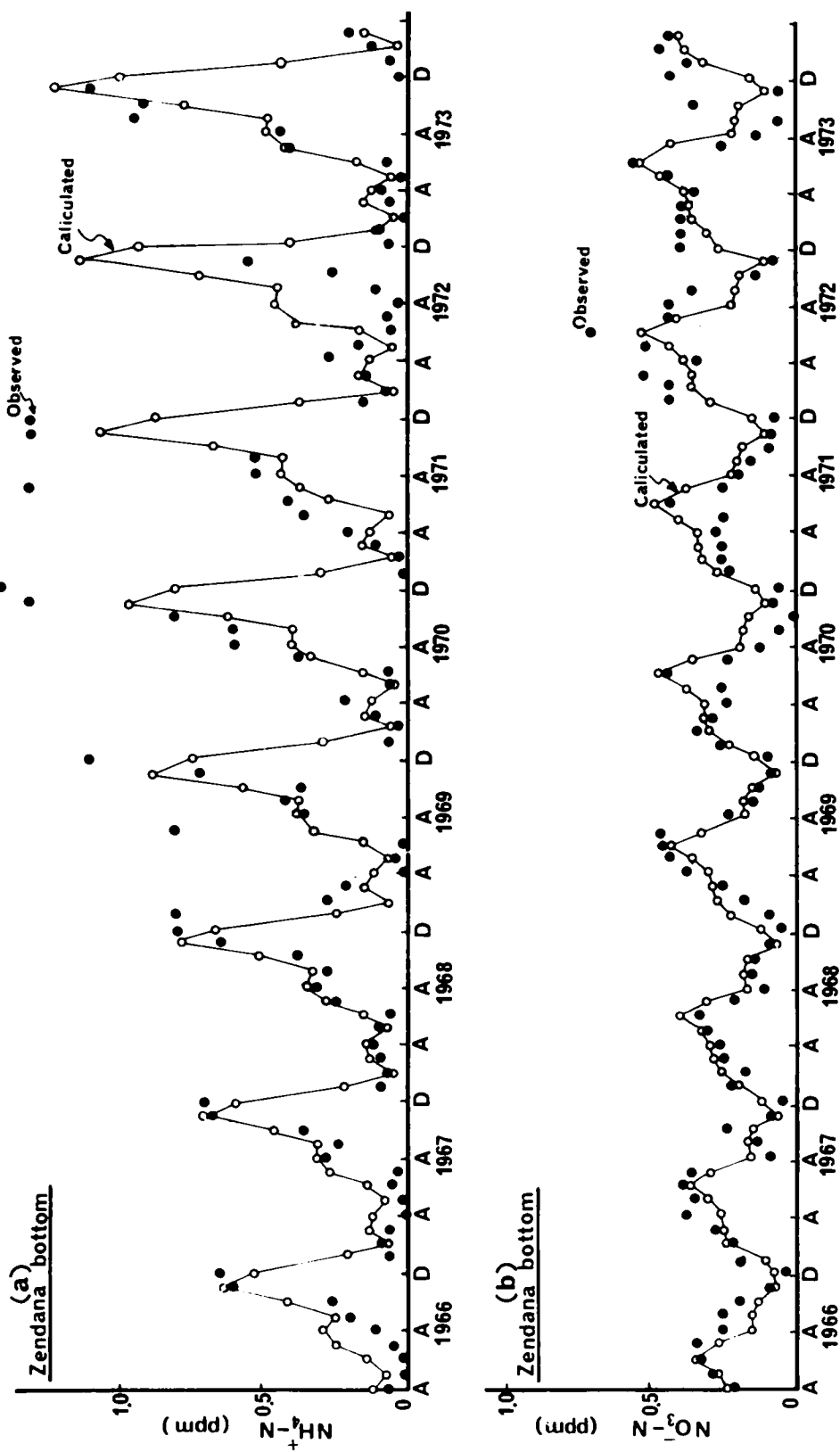


図 3-54 (a), (b) 底層の NH_4^+-N と NO_3^--N の経年変化と時系列解析結果 (膳棚地点)

質変化の定式化という手順により時系列解析を行なっている。

その結果、水温、DO、pH、全Mnは1年周期の定常的な季節変化が支配的であり、余弦関数で定式化でき、F検定から経年変化は認められなかった。これに対して、栄養塩および水質汚濁指標などでは、無機態窒素、 KMnO_4 消費量、アルカリ度、 $\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$ において、定常的な1年の周期性の他に、年々水質の悪化する経年変化が見られ、将来濃度の統計的な推定値も求めている。とくに底層の最深部における水質変化は、各種水質にその蓄積効果などが顕著に現われる部分で、DO、全Mn、無機態窒素、 KMnO_4 消費量に特徴的な変化があり、無機態窒素、 $\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$ 、 KMnO_4 消費量に経年変化が見られた。また、 PO_4^{3-} およびTOCについても1年間のデータよりその季節変化を調和分析で求めている。この変化は底質と水体との物質交換あるいは物質移動として、栄養塩、MnおよびFeの溶出回帰など水質汚濁や富栄養化と関係があり、水利用上の障害をひき起こす。

また、流下方向の変化における特色は、水深の小さな地点では温度躍層の存在の有無を含めた混合度において、その値が大きく、一定水深以上になると水平方向の水質変化は小さくなる傾向が認められた。

この長期傾向を含めた水質変化の余弦関数による定式化は、後の第5章において、生態系と水質との関係のシミュレーションで利用することになる。また、生物量としては富栄養化傾向との関連から、植物プランクトン濃度に注目して、クロロフィルaの測定結果とも比較し、その高い相関度を確認している。

参 考 文 献

- 1) 神戸市水道局：「水質試験成績」昭和41年度～昭和47年度 神戸市水道局 (1967～1974)
- 2) 合田 健：「上水浄化における水理学上の諸問題」京都大学学位論文 (1956)
- 3) 半谷高久：「水質調査法」丸善 (1960)
- 4) 半谷高久編著：「水分析におけるサンプリング」(フィールドワーク・シリーズ)講談社サイエンティフィック (1972)
- 5) 小山忠四郎，半田暢彦，杉村行男：「湖水・海水の分析」(フィールドワーク・シリーズ)講談社サイエンティフィック (1972)
- 6) 小島貞男，三村秀一，菅野明男：「上水・井戸水の分析」(フィールドワーク・シリーズ)講談社サイエンティフィック (1974)
- 7) 日本水道協会：「上水試験方法」1970年版 日本水道協会 (1973)
- 8) 日本分析化学会北海道支部編：「水の分析」(新版) pp. 187～377 東京化学同人 (1971)
- 9) 吉川和弘：「土水計画とOR」 pp. 115～129 丸善 (1969)
- 10) 井上栄一：「気象統計学」 pp. 121～168 地人書館 (1968)
- 11) M. G. Tunzi, M. Y. Chu and R. C. Bain, Jr : "In-vivo Fluorescence, Extracted Fluorescence, and Chlorophyll Concentrations in Algal Mass Measurements" Water Research Vol.8, No.9, pp.623～635 (1974)
- 12) C. J. Lorenzen: "A Method for the Continuous Measurement of in-vivo chlorophyll Concen-

tration” Deep Sea Research Vol.13, pp.223~227 (1966)

- 13) 赤沢寛, 橋本徳蔵 : 「相模湖における富栄養化の過程」水道協会雑誌, 第 477 号, pp. 13 ~ 26 (1974)
- 14) 中本信忠 : 「神流湖の淡水赤潮について」用水と廃水, Vol. 17, No 2, pp. 65 ~ 71 (1975)
- 15) 井上頼輝 : 「水質汚濁機構と富栄養化のモデルについて」水質汚濁研究に関するシンポジウム (日本水質汚濁研究会) 講演集, pp. 37 ~ 62 (1975)
- 16) Vollenweider, R. A. : “Water Management Research” OECD Paris. DAS / CSI / 68.27. Mimeographed. 183p.

第4章 模型実験による流動および水質変化の研究

第1節 概 説

実際の貯水池における観測では、種々の条件が複雑にからみ合っており、条件を自由に変えることができない上、時間的および場所的な制約のために得られる結果は限られたものとなる。さらに、現地での観測の他に実験を行なうことは、諸般の事情から困難な場合が多い。したがって、ある現象に注目して、それを明らかにしようとする場合、模型実験が有効な手段となる。すなわち、貯水池の模型実験においては、各種水質因子の流動への追従性など、流動と水質が複雑にからみ合う上、ひずみ模型の相似則など解決すべき問題が多いが、現時点では、模型実験による各種の変化機構の究明は必要である¹⁾。また、この模型実験は、実際の貯水池の観測と補完的な関係にあり、これに理論的な研究を組み合わせることが重要である。

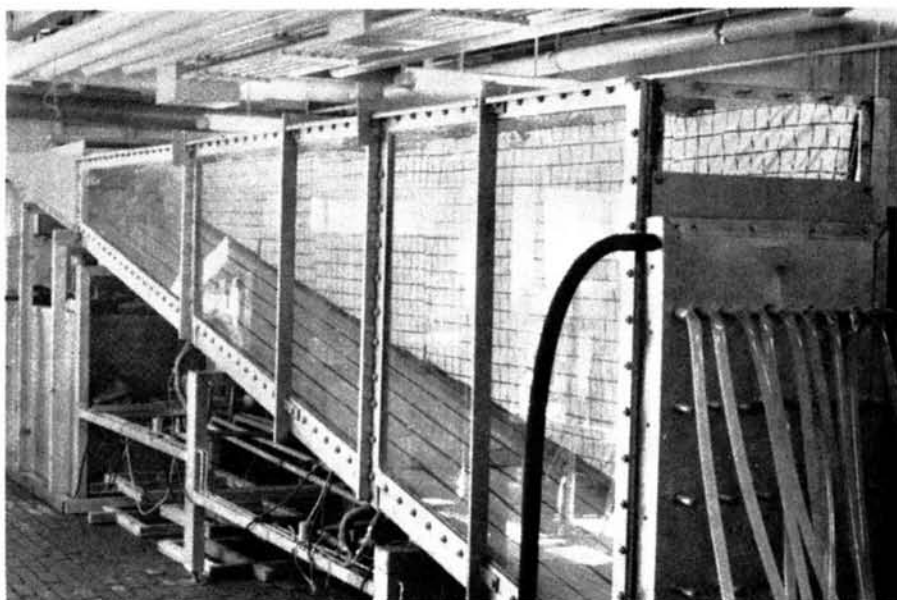
ここでは、各種貯水池の特殊性は考慮に入れず、一般的に認められる現象を解明するために、貯水池模型としては簡潔な形状を選択し、水温分布による水質変化を把握するために装置は人工的に安定した温度成層状態が得られるように工夫した。

模型実験では、実際の貯水池で見られる水温の鉛直分布の状態変化に伴う水質因子の挙動に注目するため、いくつかの流動パターンあるいは水温成層状態をつくり出すことが第1目的である。そして各種の流動パターンあるいは水温成層状態下での水質分布の挙動を追求することになる。したがって、一定の流動状態下における水質変化を、流動状態を変え、かつ水質因子を変えて実験を行なった。まず、水温および流速分布をチェックし、浮遊性物質としては粒径の異なる炭酸カルシウムとカオリンについて、溶解性物質としては塩化ナトリウムおよび溶存ガスの挙動をみるため亜硫酸ナトリウムについて実験を行なっている。とくに、温度躍層面付近での物質移動に注目して、その温度分布、流速分布および水質分布をもとに物質移動の機構をみることに主眼を置いている。また、実験は風による擾乱や天候による影響をさけるために室内実験とし、実験室の環境条件の変化の少ない時間帯に、敏速に測定し、採水することに心がけた。

得られた結果の主要なものは後の第5章の理論解析の比較対照に用いられる。したがって、ここでは主として各種条件に対する結果の特性と相似律が検討されることになる。

第2節 実験装置

模型貯水池実験装置は、図4-1に示すように、本水路と補助水路、採水装置と測定機器から成っている²⁾。本水路は幅60cm、長さ500cm、深さが流入端で30cm、下流端で130cmの5分の1の底面勾配を有している。この水路は写真-1のように側面が観察用のためにガラス面であり、他の側面、底面、および下流端側面は断熱材を内蔵したステンレス面である。また、底面には貯水池内に人工的に温度成層状態がつくり出せるようにサーモスタットを有する冷却装置を備えている。そして、本水路の前部に同じ幅、同じ底面勾配で、長さ100cmの補助水路と、流入水のための流入調整槽が付属している。さらに、流出端



写真－１ 貯水池模型実験槽

の放流装置は、越流（overflow）方式の他に³⁾、鉛直方向に 20 cm 間隔で 4 カ所に流出装置があり、それらは近似的に line 状に放流できるように、1 カ所に 10 個の円筒排出管が備えられ、ビニール管とホフマンコックで流量調整ができるようになっている。採水装置は、図 4－2 のように内径 3 mm の銅管を水深方向に 5 cm 間隔で L 字形に何本かまとめたもので、流下方向に 6 カ所設置した。

さらに水温躍層強化のために水表面上に赤外線電球 20 個による表面加熱装置を加えた。

測定装置としては、水温測定にはサーミスター温度計（芝浦電子製作所，MGB－Ⅲ型），乾球・湿球温度測定にはアスマン型ミゼット通風乾湿計（服部時計店，SY－3 型），気圧測定にはアネロイド型指示気圧計（日本気象測器製）を使用した。

とくに、水温測定のためには、サーミスター温度計のプロープに工夫を加え、直径 3 mm、長さ 150 cm の細い円柱状とし、流れを極力乱さないように試作して温度検定を行ったものを用いた。

第 3 節 実験方法

人工的に温度成層状態をつくり出すには、まず模型貯水池に所定水深まで水を貯め、冷凍機により底面からの冷却を開始する。その後、下層の水温が 10℃以下になるのを待ち、流入水量を 0 から徐々に増加させて所定の流入量にするとともに、流出水を所定の放流位置から流入水量に見合うだけ流出せしめ、所定的水深を維持しつつ、水温、水量、流動などが定常になってから測定を開始する。普通、この準備時間には、4～5 時間を有するが、温

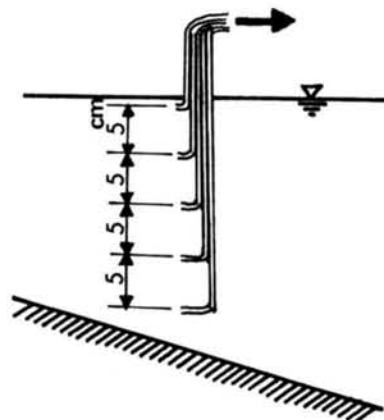


図 4－2 採水装置

度成層のない場合には、冷却が不必要なので準備時間は 0.5 ～ 1 時間であった²⁾。

(1) 水温および流速分布の測定

上記の準備時間に水温、流量、したがって流動状態を定常に保った後、水表面上の気温、気圧、乾球・湿球温度の測定に続いて、流入水温と流入端の 0 cm の位置から流出端に向かって 6 カ所で鉛直方向に 5 cm 間隔でサーミスター温度計にて水温を測定した。そして、最後に流出水温を測定し、流入水温の変化のないことも確認しておいた。流速分布の測定は、粒状のメチレンブルー色素を流入端から流出端までの 5 カ所程度で水表面から沈降させ、その痕跡の位置の時間変化によって行なった。流量は、一定時間の流入量をメスシリンダーで測定した。この水温・流速実験では、(i) 流入量、(ii) 水深、(iii) 放流位置、(iv) 流入水温、(v) 大気温と表面水温差の条件を変えてその変化を検討する。

(2) 浮遊性物質に関する実験

まず、(1) のように流動状態が定常に達した後、一定濃度の浮遊性物質を含む原水は貯留タンクより補助水路の前部の流入調整槽へポンプアップし、水道水と混合の後、流入水として補助水路を経て本水路に導入される。貯留タンクでは、攪拌翼で浮遊物質の沈殿を防止し、流入調整槽における混合攪拌にも攪拌翼を用いた⁴⁾。

採水は図 4-2 の採水装置にビニール管を接続してサイフォン方式によって行ない、試料水はガラスびんに保存して濃度測定を行なっている。採水速度はサイフォン末端のコックの調節で調整した。採水とつぎの採水までの間に、水温測定や流動状態のチェックを行なった。そして、最終回の採水後、トレーサーによる流速測定を行ない、流入量のチェックも加えた。浮遊性物質の濃度はそれ自身による密度流を起こさぬ程度の濃度にとどめた。

浮遊性物質として、沈降速度の大きい難溶性の炭酸カルシウム（沈降性、比重 2.71、平均粒径約 10 μ ）と、沈降速度の小さいカオリン（白陶土、比重 2.62、平均粒径約 3 μ ）の両者を用い、実験条件として放流位置や流量を変化させた場合のほか、温度成層の有無の場合に分けた実験も行ない比較検討を試みた。また、別に直径 14.5 cm、長さ 100 cm の沈降筒を用い、炭酸カルシウムおよびカリオンの沈降速度分布を求めている。

(3) 溶解性物質に関する実験

まず、貯留水には一定濃度の溶解性物質を含む水溶液をつくってこれを用い、貯留水の冷却を開始する。所定の冷却段階に達した後、流入水として、貯留水と同一濃度の溶解性物質を含む水溶液を導入し、所定の流量まで上げて約 90 分間流入させる。この間に流動状態は定常状態に達している。そして、流入水を同一流量で一定濃度の溶解性物質水溶液からその濃度 0 の水道水に瞬間的に切り換えて、その後の水質変化を追跡する⁵⁾。この濃度の切り換え直前に、槽内が一定濃度に維持されているかチェックしている。

濃度の切り換え後、(2) と同様に一定時間間隔で採水を行ない、その採水の間に、水温測定と流速測定を行なう。また、流入量と流出量のチェックもその間に行ない、最後に正確な流量測定を行なう。

溶解性物質には、反応のない物質として塩化ナトリウム、反応のあるものとして溶存酸素と反応する亜硫酸ナトリウムを用いた。溶解性物質濃度が密度分布に多大な影響を及ぼさぬように、主躍層の水温による密度差（約 10^{-3} g/cm³/cm）より 1 オーダ低くして、最高濃度を約 700 ppm 以下におさえた。

実験条件として、温度成層の有無に大別して、放流位置および流量を変化させた実験を行なって比較検討した。

第4節 実験結果および考察

(1) 水温変化

流入水量、流入水温、湛水水深、取水（放流）位置、気温・水温差などの各種条件を変化させた場合の、水温と流動の変化の特性を調べた。まず、流速の鉛直分布の流下距離方向の変化を図4-3～図4-7に取水（放流）位置の異なる5つの場合について示す。これらはいずれも最大水深（流出端水深）が100 cmのものである。これらから以下の現象が認められた。

- (1) 変水層あるいは温度躍層の最上部を上部温度躍層面とすると、この位置が図4-8に示すように流量の増加に対してリニヤーに低下することが認められる。これは実際の貯水池観測においても、成層期中程度の出水に対して認められる現象である。
- (2) 取水（放流）位置の低下に対して、温度躍層は図4-9に示すように直線的な低下を示す。ダム貯水池の主躍層は放流や取水の位置に支配されることがこの模型実験においても確認できた。
- (3) 越流放流（取水）の場合、図4-10に示すように放流あるいは取水口付近における温度躍層の上昇傾向が認められた。これは、すでに松原・奥田による研究結果の確認となった⁶⁾。
- (4) 水表面の上下における気温と水温の差の正負に応じた熱移動は、結果としての水温分布曲線の水表面下数cmの層での接線勾配の正負として確認できた。これは図4-11と図4-12の比較より明らかである。

これらの水温分布と流速分布の関係において最も重要なものは、温度躍層と流速分布の関係である。放流あるいは取水位置によって貯水池内の流動は変化することから、主躍層の位置およびその温度勾配の大きさから、躍層強度（安定度）も知ることができる。さらに、温度躍層付近の流速分布形状より、内部境界面としての温度躍層面での水塊の混合程度を知ることができる。その指標である鉛直安定度（ E ）、 R_i 数、拡散係数（ E_z ）についてまとめたものが表4-1である。ただし、その計算は下記の式によって行っている。

$$E = \frac{d\rho}{dz} = \frac{\rho_{i,j+1} - \rho_{i,j}}{\Delta z}$$

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = E_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad \text{より} \quad E_z = u \frac{\partial C}{\partial z} \bigg/ \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = u_{ij} \cdot \frac{C_{i,j+1} - C_{i,j-1}}{2 \times \Delta z} \bigg/$$

$$\frac{C_{i,j+1} + C_{i,j-1} - 2 \times C_{i,j}}{(\Delta z)^2}$$

$$R_i = \frac{g}{\rho} \frac{\frac{\partial \rho}{\partial z}}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2} = \frac{g}{\frac{\rho_{i,j+1} + \rho_{i,j}}{2}} \cdot \frac{\frac{\rho_{i,j+1} - \rho_{i,j}}{\Delta z}}{\left(\frac{u_{i,j+1} - u_{i,j}}{\Delta z}\right)^2}$$

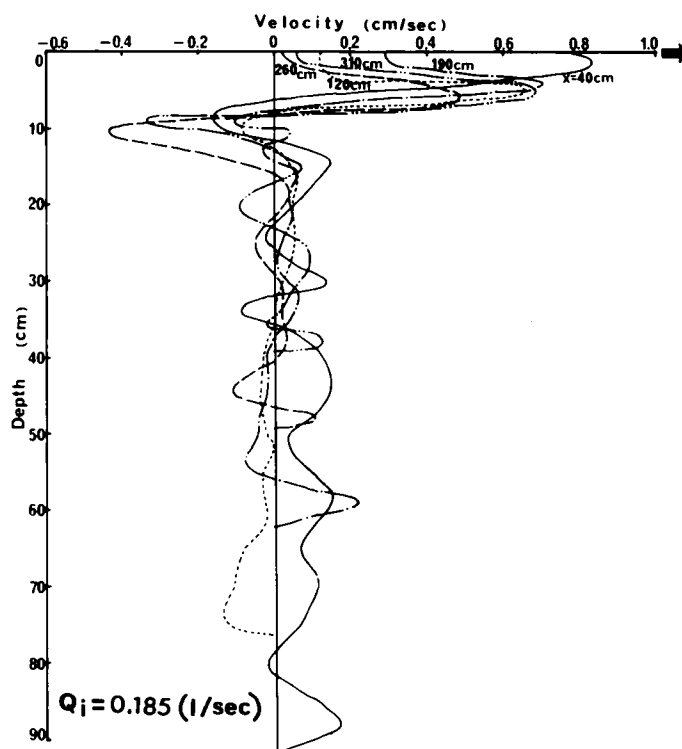


図 4-3 流速分布（越流放流の場合）

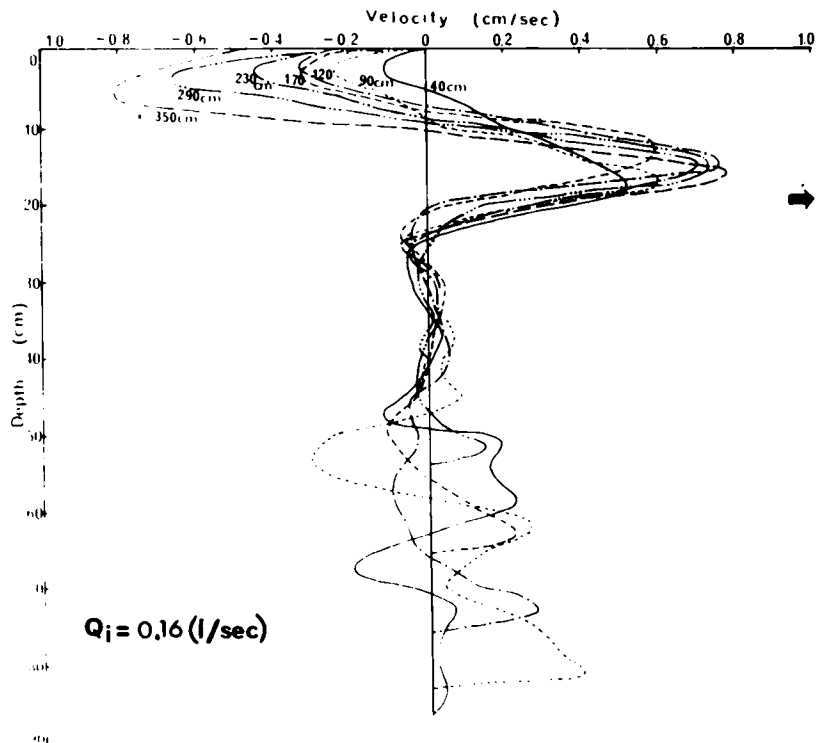


図 4-4 流速分布（水面下 20 cm 放流の場合）

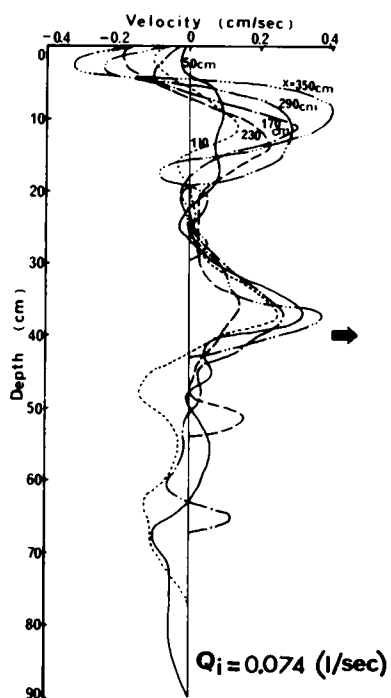


図 4 - 5 流速分布 (水面下 40 cm 放流の場合)

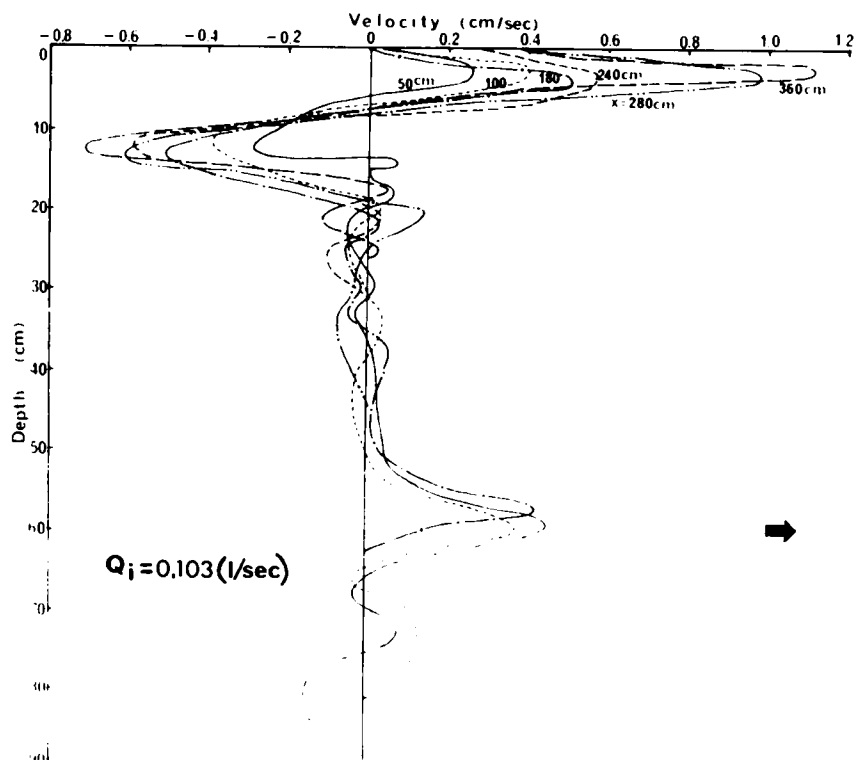


図 4 - 6 流速分布 (水面下 60 cm 放流の場合)

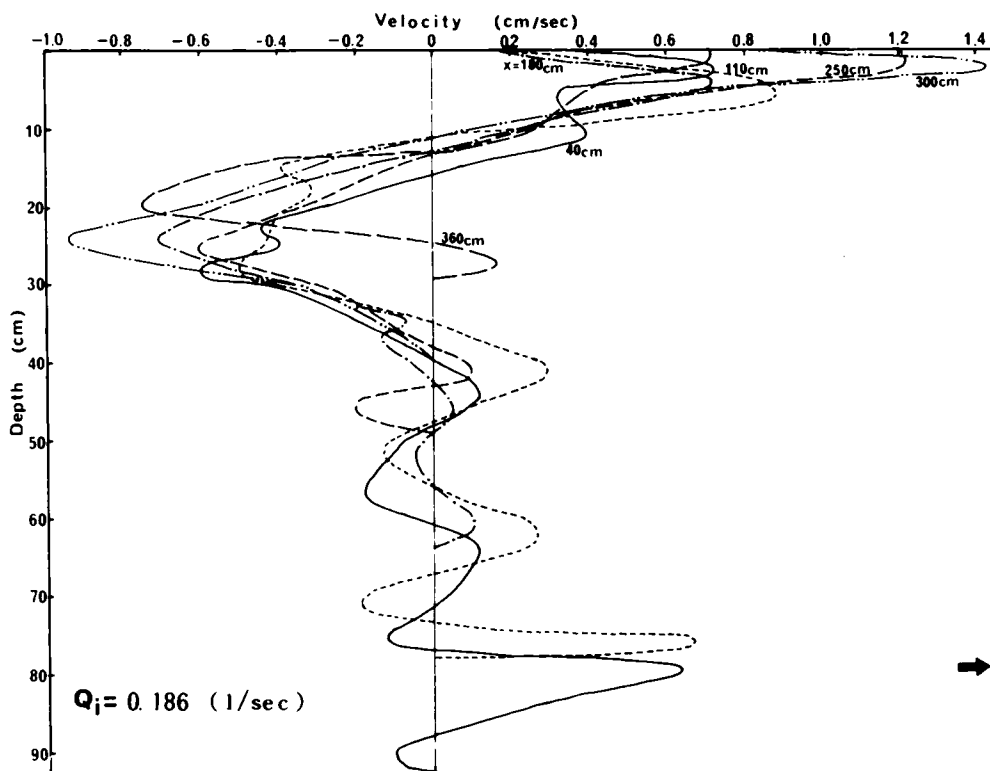


図 4 - 7 流速分布 (水面下 80 cm 放流の場合)

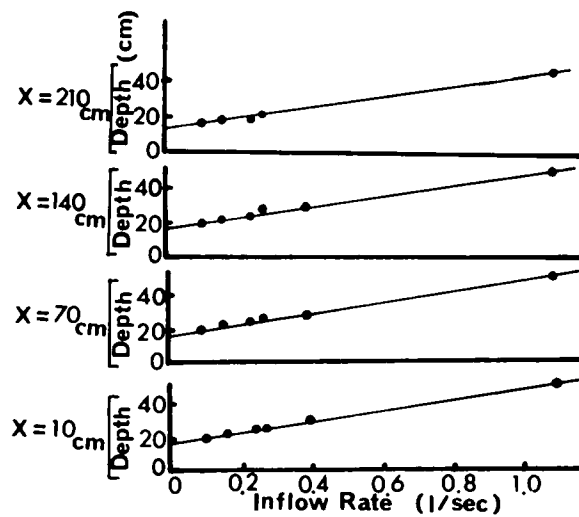


図 4 - 8 流入量と上部躍層面水深との関係

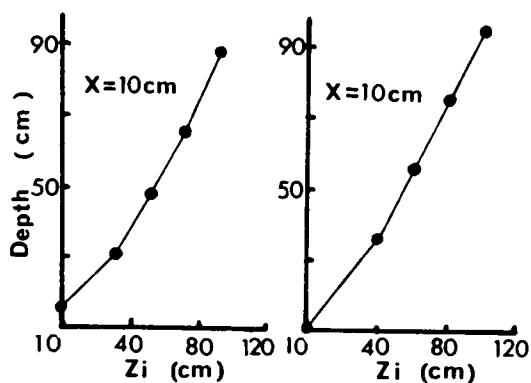


図 4-9 取水位置 (Z_i) と上部温度躍層面水深との関係

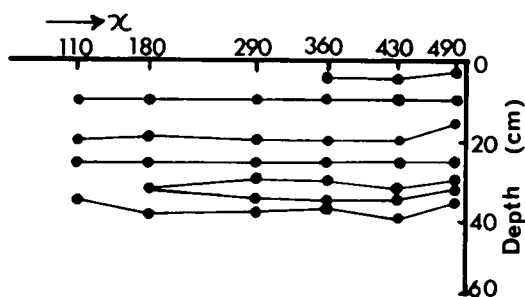


図 4-10 上部温度躍層面水深の流下距離(x) 方向の変化

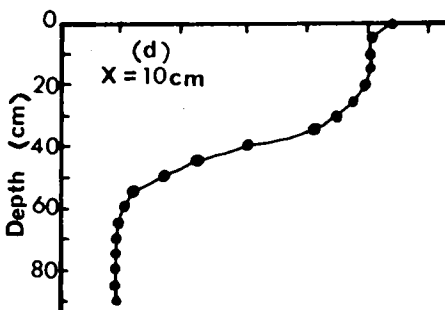
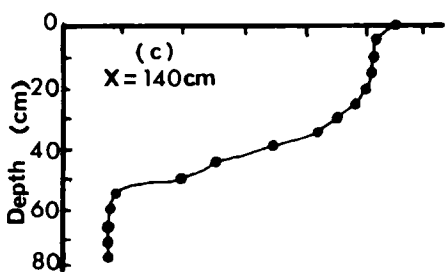
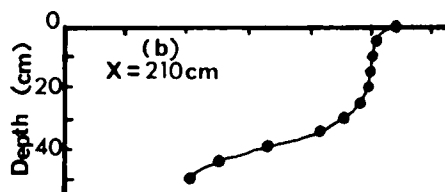
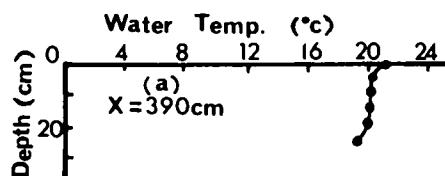


図 4-11 水温の鉛直分布例

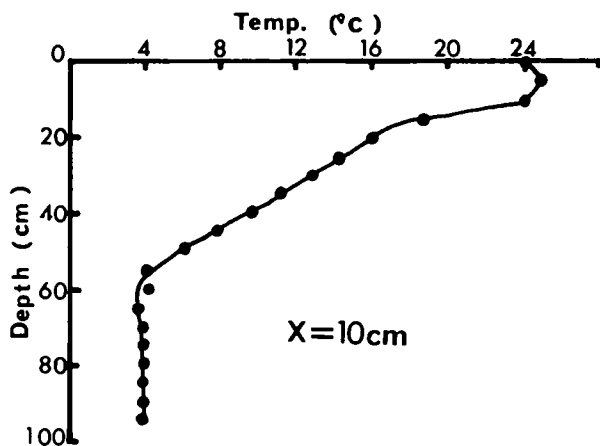


図 4-12 水温の鉛直分布例

表 4 - 1 (a)鉛直安定度 (E), 拡散係数 (E_z), および Richardson 数

水深 (cm)	$E(10^{-6},$ g/cm ²)	$E_z(10^{-2},$ cm ² /sec)	Ri	水深 (cm)	$E(10^{-6},$ g/cm ²)	$E_z(10^{-2},$ cm ² /sec)	Ri	水深 (cm)	$E(10^{-6},$ g/cm ²)	$E_z(10^{-2},$ cm ² /sec)	Ri	水深 (cm)	$E(10^{-6},$ g/cm ²)	$E_z(10^{-2},$ cm ² /sec)	Ri
0	- 25	1.38	6.8	17	109	1.00	118.8	34	34	0.33	6.8	51	21	0.33	823.2
1	- 25	1.18	1.7	18	88	0.17	863.5	35	32	0.38	6.4	52	9	0.77	22.1
2	- 12	大	0.7	19	94	0.42	3689.0	36	32	0.93	34.9	53	4	0.20	9.8
3	- 13	大	2.6	20	41	0.35	100.6	37	30	大	32.7	54	1	0.83	2.5
4	- 25	1.17	1.0	21	48	0.90	470.9	38	30	0.30	294.1	55	0	1.08	0.0
5	0	大	0.0	22	48	0.55	52.3	39	36	0.00	1411.6	56	- 1	大	9.8
6	13	0.00	127.8	23	47	0.35	12.8	40	18	0.22	176.4	57	0	2.00	
7	0	0.07	0.0	24	75	0.12	183.9	41	25	0.47	245.1	58	0	1.63	
8	12	0.80	0.3	25	44	0.40	17.3	42	24	0.00	941.0	59	0		
9	0	0.43	0.0	26	43	0.58	46.9	43	31	0.00	1215.4	60	0.5		
10	125	0.16	15.2	27	56	0.73	34.3	44	34	0.23	1333.0	61	0		
11	243	0.41	14.1	28	40	1.08	98.1	45	13	0.87	127.4	62			
12	255	1.08	156.6	29	72	0.70	706.0	46	18	1.05	4.9	63			
13	307	0.48	753.7	30	18	大	1.8	47	12	0.93	13.1	64			
14	247	0.33	2424.9	31	37	0.45	7.4	48	21	0.40	205.8	65			
15	98	0.47	240.5	32	24	0.53	9.4	49	15	0.36	147.0	66			
16	152	0.53	165.8	33	35	1.50	343.2	50	35	0.16	1373.1	67			

表 4 - 1 (b)鉛直安定度 (E), 拡散係数 (E_z) および Richardson 数 (Ri)

水深 (cm)	$E(10^{-6},$ g/cm ³)	$E_z(10^{-2},$ cm ² /sec)	Ri	水深 (cm)	$E(10^{-6},$ g/cm ³)	$E_z(10^{-2},$ cm ² /sec)	Ri	水深 (cm)	$E(10^{-6},$ g/cm ³)	$E_z(10^{-2},$ cm ² /sec)	Ri	水深 (cm)	$E(10^{-6},$ g/cm ³)	$E_z(10^{-2},$ cm ² /sec)	Ri
0				17				34				51			
1	115	1.50	70.6	18	57	0.00	139.9	35	37	0.01	1451.2	52	22	0.85	53.9
2	67	3.13	3.9	19	55	0.02	539.8	36	36	0.05	1411.9	53	20	0.21	196.0
3	45	3.25	6.9	20	55	0.01	2158.9	37	23	0.10	225.5	54	17	0.13	166.6
4	22	3.08	54.0	21	89	0.01	2328.9	38	36	0.08	352.9	55	15	0.06	588.0
5	44	1.20	432.1	22	69	0.02	2708.0	39	31	0.12	1215.7	56	12	0.30	470.4
6	11	2.13	6.8	23	68	0.04	2668.0	40	32	0.00	313.7	57	8	0.15	19.6
7	11	0.88	0.9	24	65	0.07	2550.7	41	21	0.13	205.9	58	6	0.10	39.2
8	21	0.73	2.1	25	80	0.10	3139.1	42	30	0.06	1176.4	59	4	0.50	235.2
9	11	0.33	3.0	26	31	0.08	1216.3	43	29	0.30	284.2	60	3	0.55	7.4
10	11	0.25	27.0	27	46	0.33	1804.8	44	32	0.15	1254.8	61	1.5	0.73	3.7
11	43	0.20	1688.9	28	44	0.35	107.9	45	30	0.10	294.1	62	2	0.80	4.9
12	53	0.17	520.4	29	44	0.58	107.9	46	20	0.50	784.2	63	0.5	0.80	19.6
13	63	0.50	618.5	30	42	0.40	411.9	47	24	0.55	941.0	64	1	0.47	9.8
14	82	0.23	3220.1	31	42	0.30	411.9	48	26	0.73	254.8	65	0	0.85	
15	110	0.17	4319.2	32	40	0.17	392.3	49	14	0.80	548.9	66	0	0.21	
16	39	0.22	382.8	33	39	0.03	382.4	50	20	0.80	784.1	67	0	0.13	
	77	0.23	188.9		39	0.05	1529.7		30	0.47	294.0		1	0.02	

これらの結果は、温度躍層の位置あるいは水温鉛直分布の制御として第6章の水質管理に役立つほか、温度躍層部での混合現象は第5章の水質変化の解析における境界条件の決定の基礎をなすものである。この水温と流速の鉛直分布の相対的な関係の認識のもとに、つぎの浮遊性物質や溶解性物質の実験を行なっている。

(I) 浮遊性物質

流動に伴う浮遊性物質の濃度分布を支配する最も大きな要因は、その物質の沈降速度である。浮遊性物質として実験に使用した炭酸カルシウムとカオリンの沈降速度の分布を濃度で示したものが図4-13(a)、(b)である。この図からも明らかなように、粒径および比重の関係から沈降速度の小さいカオリンはその85%が0.03 cm/sec以下であり、沈降速度の大きい方の炭酸カルシウムはその85%が0.01~0.1 cm/secの範囲にある。この2種の浮遊性物質は、著者が比較のためにその沈降速度の分布を求めた、千苅貯水池上流の羽束川・波豆川および熊野川水系十津川上流の無機性の堆積砂や、ガレ場の土砂の沈降速度(80~90%が0.01 cm/sec以下)と比べると、カオリンが河川での浮遊性物質に近い。また、著者の求めた下水処理場およびし尿処理場放流水中の有機性の浮遊物質の沈降速度も95%以上が0.05 cm/sec以下とこの炭酸カルシウムとカオリンの間に入るものが多い。したがって、この2種の浮遊性物質は無機性、有機性の別なく貯水池へ流入する浮遊性物質として、以下の実験での使用がその沈降速度の観点から妥当と考えられる。

浮遊性物質の貯水池流入に伴う濃度分布の変化は、その沈殿堆積量は別にして、成層の有無にかかわらず一定時間の経過後はほぼ平衡状態に達する。その一定時間経過後の平衡状態における濃度分布を模型貯水池の縦断面に等濃度線で示したものが図4-14~図4-17である。

(1) 成層していない場合

温度成層していない、すなわち、水温の分布が一様な場合は、その浮遊性物質の濃度分布はその流入水の流動に支配されるが、その上下の混合度が大きい場合、時間の経過とともに全層ほぼ一様な分布になる。このことは、カオリンおよび炭酸カルシウムともに認

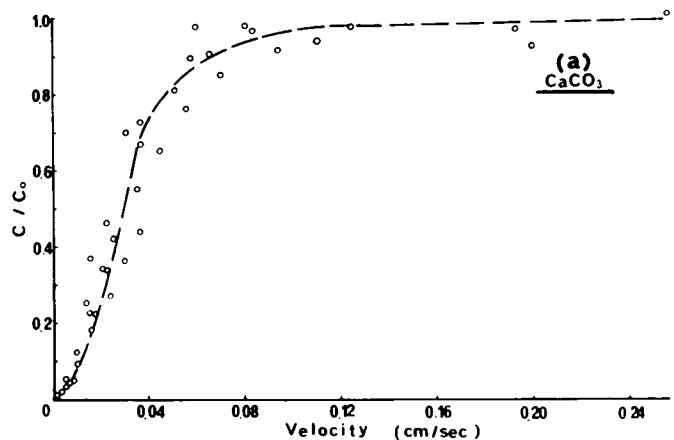


図4-13 (a)炭酸カルシウム(沈降性)の沈降速度分布

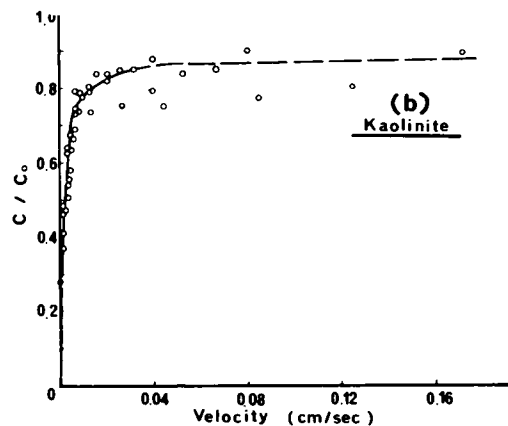


図4-13 (b)カオリンの沈降速度分布

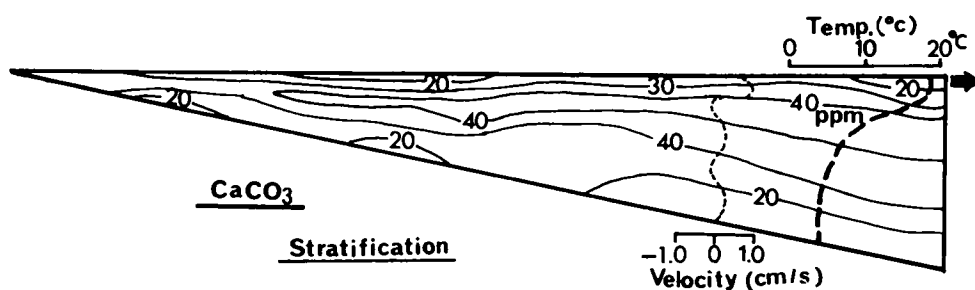


図 4-14 濁質濃度分布 (沈降性炭酸カルシウム: 越流放流)

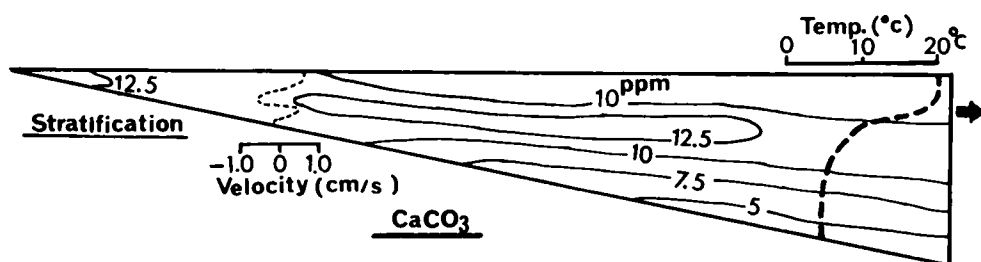


図 4-15 濁質濃度分布 (沈降性炭酸カルシウム: 水面下 20 cm 放流)

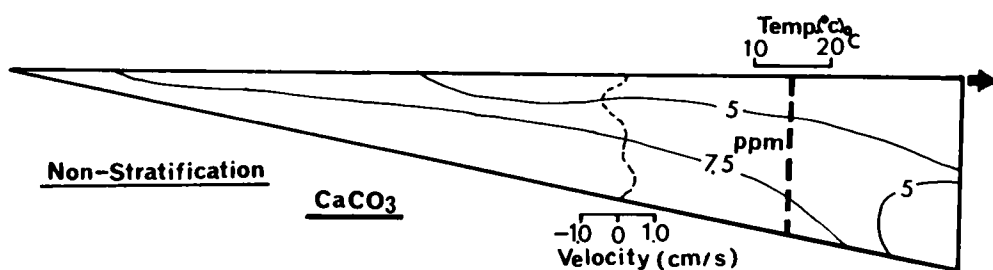


図 4-16 濁質濃度分布 (沈降性炭酸カルシウム: 越流放流, 温度一様分布状態)

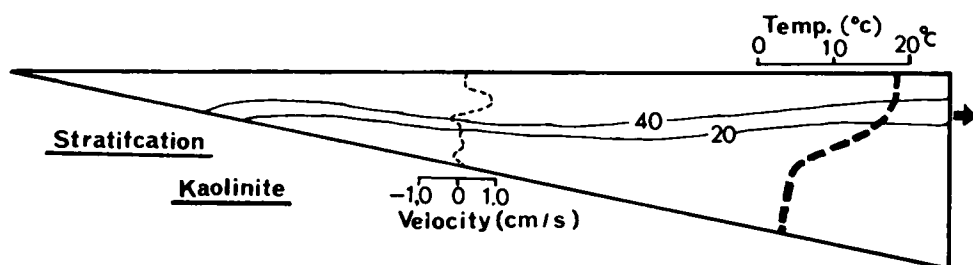


図 4-17 濁質濃度分布 (カオリン: 水面下 20 cm 放流)

められ、放流や取水の位置の影響はほとんど見られない。

(2) 成層している場合

沈降速度の小さなカオリンの場合、温度躍層を通して深水層への沈降あるいは侵入はほとんどなく、温度躍層上を流下方向に運び去られる。これに対して、沈降速度の大きい炭酸カルシウムは、一定時間経過後の平衡状態では温度躍層付近の高濃度が目立ち、実際の貯水池の濁質の温度躍層部での長期滞留現象と対応するものである。これを、ほぼ同程度の流量について成層のある場合とない場合との比較を同一地点の濃度鉛直分布で示したものが図4-18である。これにより、温度躍層部の高濃度滞留がさらに明瞭に認められる。

(Ⅱ) 溶解性物質

溶解性物質は、沈降速度を有する浮遊性物質とは異なり、生物および化学的な反応を伴う他は、その周囲の水塊と挙動をともしする。したがって、溶解性物質の挙動に関する実験は、全体的な流動状態の把握

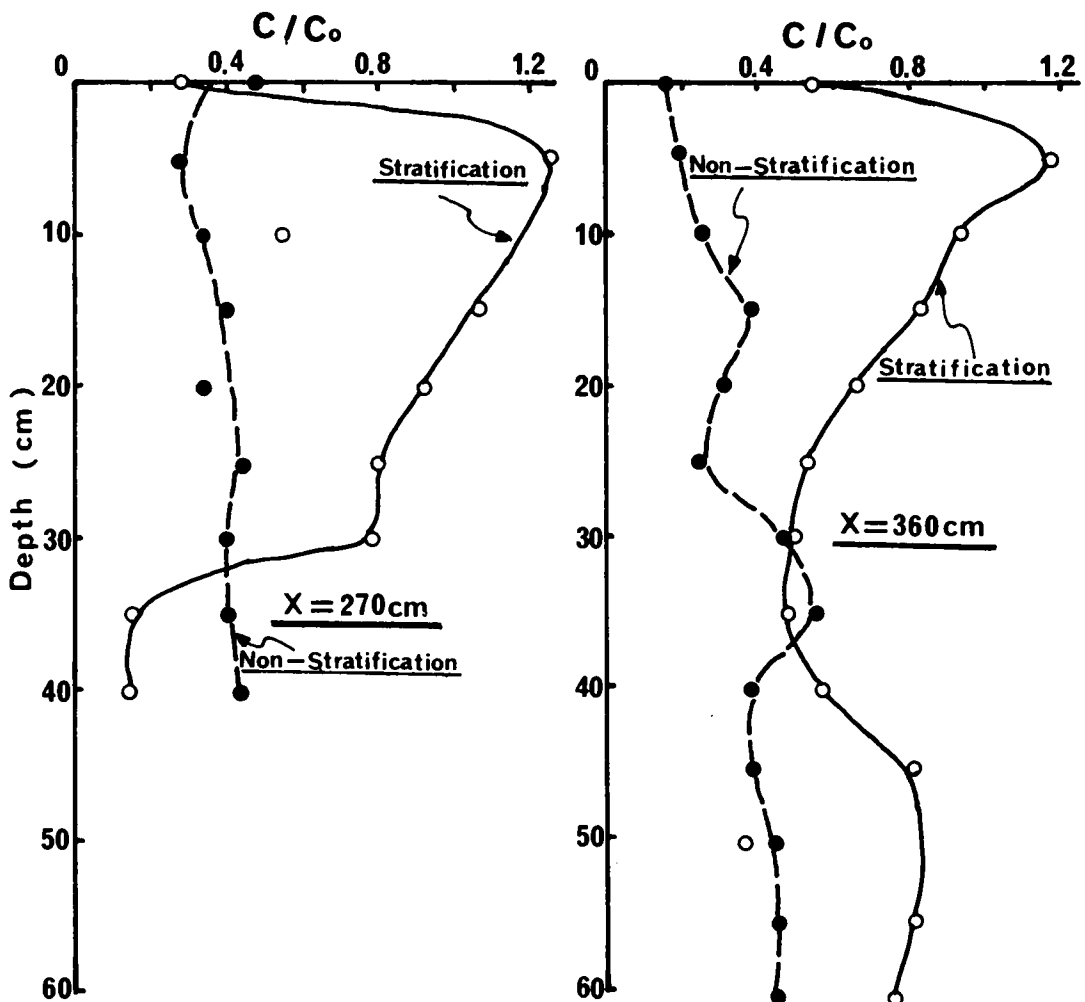


図4-18 濁質濃度鉛直分布の成層の有無による比較

や、成層状態下の温度躍層付近における各層間の水質および水塊の混合過程（あるいは連行過程）と物質移動量の定量的な関係の把握に役立つ。それゆえ、溶解性物質の実験では、鉛直方向の流速分布と濃度分布の関係、かつ、温度躍層付近の密度分布、流速分布および濃度分布の時間変化の相対的な関係が注目される。以下に、温度躍層の有無あるいは成層状態の存否によって比較しつつ、それぞれの実験結果を検討することにする。

(1) 成層していない場合

図4-19にその典型的な濃度分布の変化の場合が示されるように、時間の経過とともに表層から順に下方へと初期濃度の貯留水が流出水によって持ち出される。この連行状態はうすい膜が“ハギトラレテュク”ように観察される。そして、その濃度分布の時間変化には、流量あるいは、流速分布が支配的であるが、溶解性物質が亜硫酸ナトリウムの場合は深水層での流動は小さく影響度は低かった。

(2) 成層した場合

この場合もその濃度分布の時間変化を、その水温分布と流速分布とともにその典型的ないくつかの例を図4-20～図4-23に示す。これらから、流量によって異なるけれども、(1)の状態がしばらく続いた一定時間の経過後は、ほぼ定常的な濃度分布の時間変化を見せる。これは、図4-24に示すように流出水濃度の時間変化からも明らかである。そして、亜硫酸ナトリウムの場合、表水層だけでなく深水層においても規則的な濃度減少が見られた。また、塩化ナトリウムの場合、その温度躍層付近での濃度減少はうねりのような振動現象を伴う減少として観察された。

塩化ナトリウムの場合、その濃度 flux の温度躍層付近のオーダーは図より明らかであるが、 Ri 数は最高で1,000～2,000のオーダーになり、鉛直安定度は $100 \sim 150 \times 10^{-6} \text{ (g/cm)}$ のオーダーであった。温度躍層付近における濃度変化特性は、その内部境界面としての物質移動の境界条件として、第5章第1節で詳述することにする。また、亜硫酸ナトリウムの場合、高濃度のため水表面での曝気による減少は

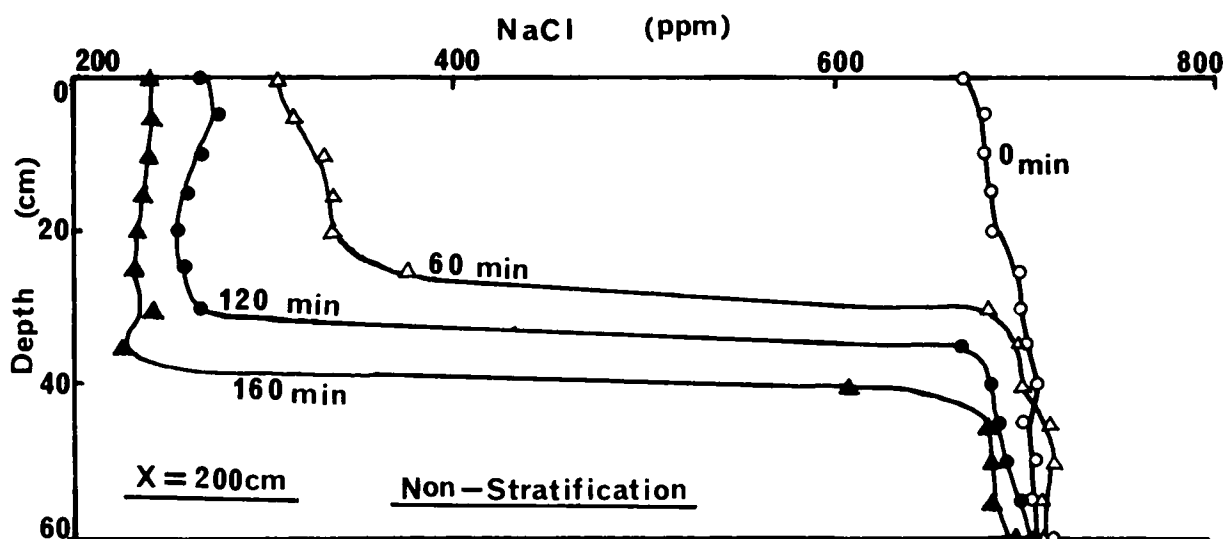


図4-19 (a)溶解性物質 (NaCl) 鉛直分布の時間変化 (温度一様分布, 越流放流)

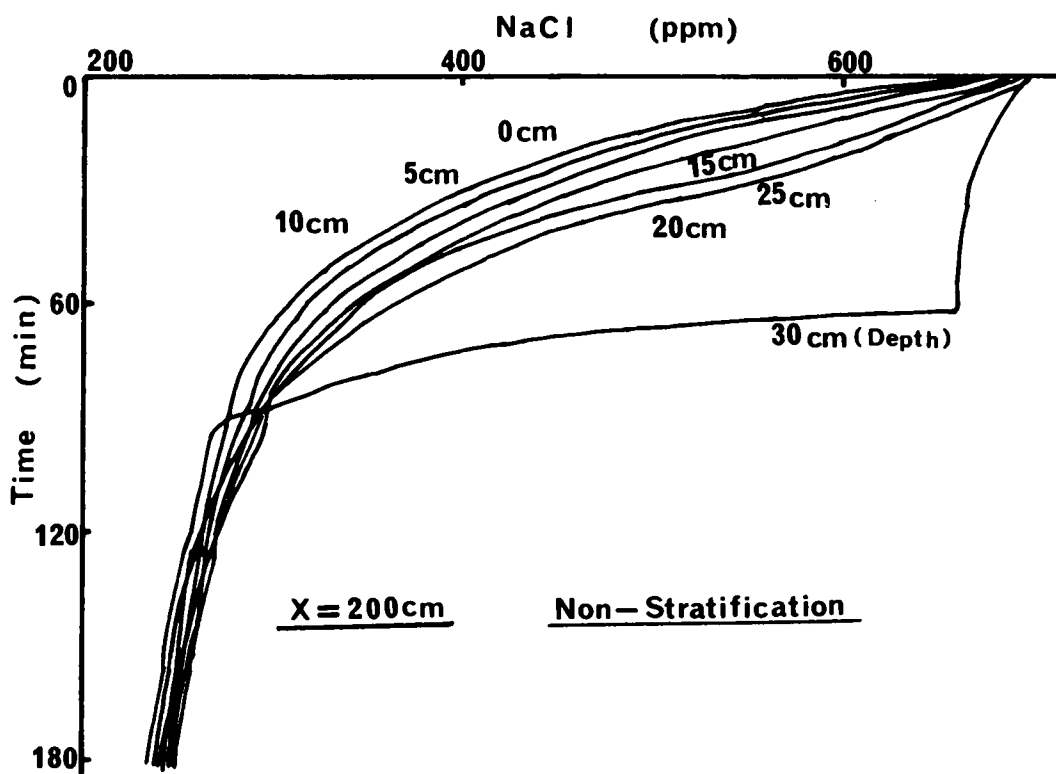


図 4 - 19 (b)溶解性物質 (NaCl) 濃度の各水深での時間変化 (温度一様分布, 越流放流)

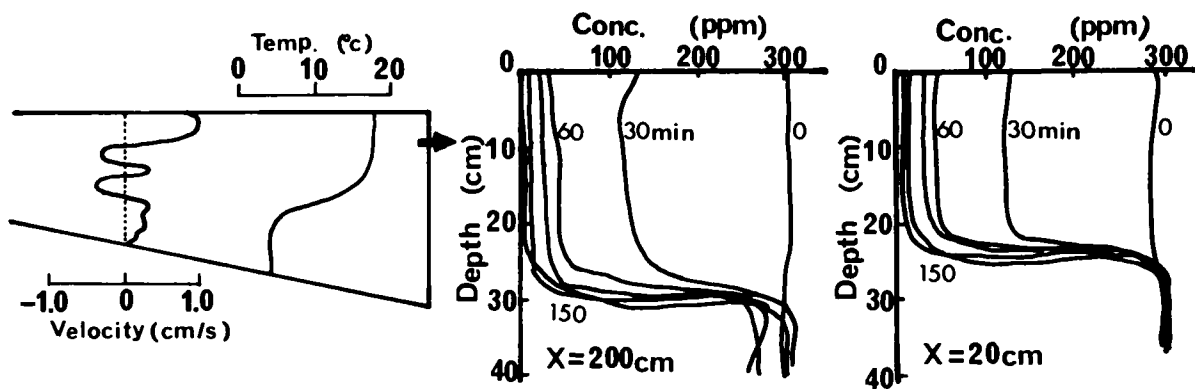


図 4 - 20 溶解性物質 (NaCl) 濃度の時間変化 (水面下 20 cm 放流, 流入量 0.43 ℓ/min)

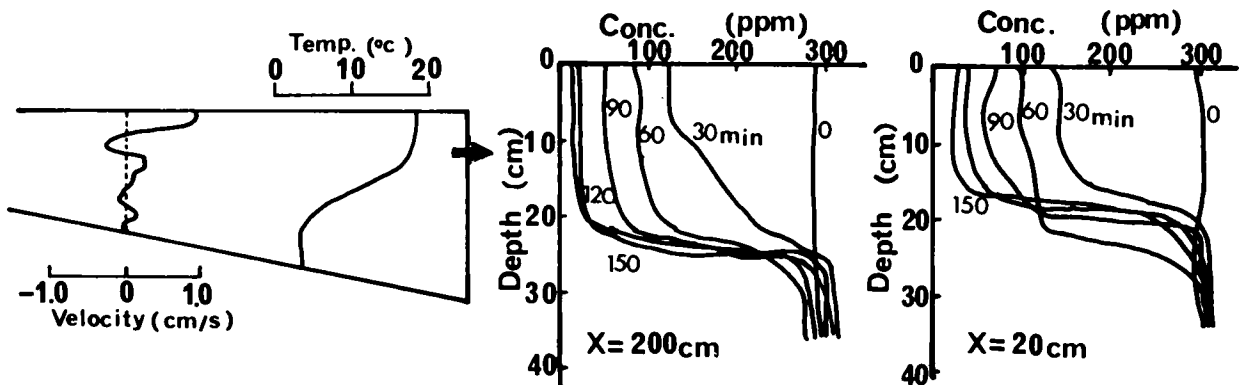


図 4 - 21 溶解性物質 (NaCl) 濃度の時間変化 (水面下 20 cm 放流, 流入量 0.20 ℓ/min)

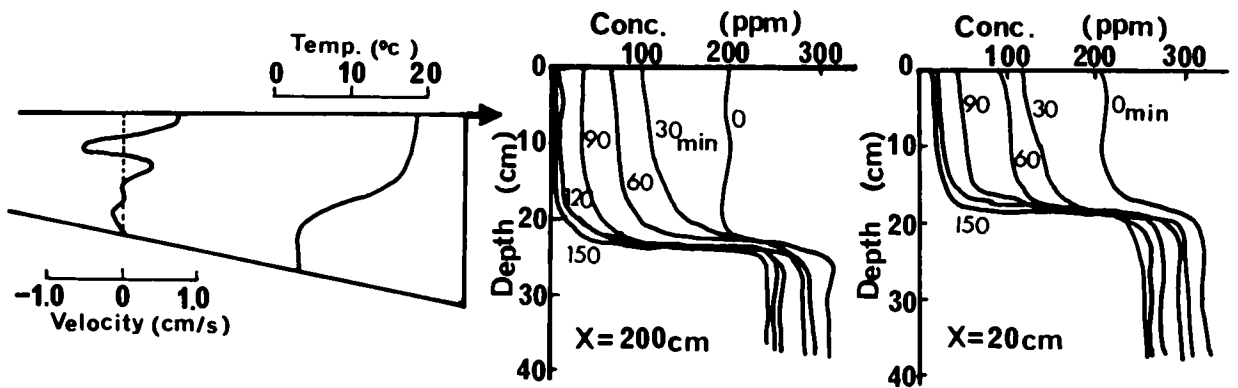


図 4 - 22 溶解性物質 (NaCl) 濃度の時間変化 (越流放流, 流入量 0.23 ℓ/min)

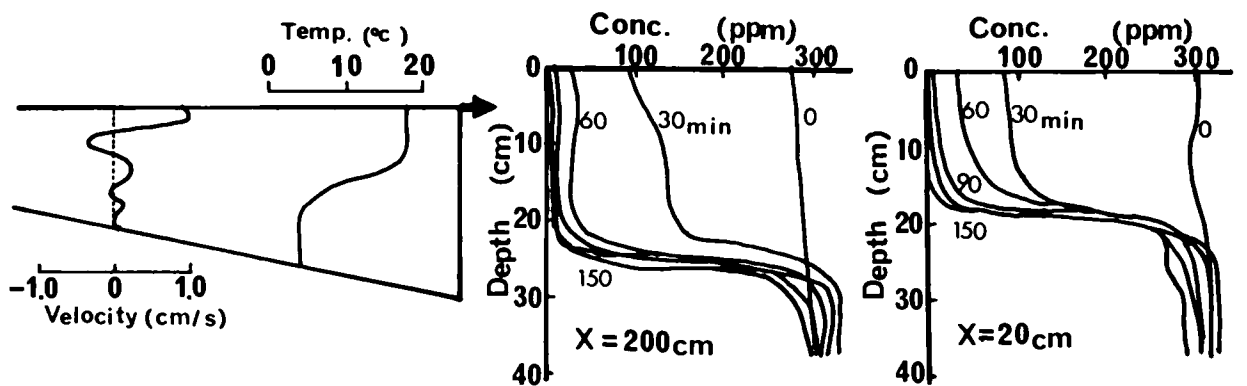


図 4 - 23 溶解性物質 (NaCl) 濃度の時間変化 (越流放流, 流入量 0.37 ℓ/min)

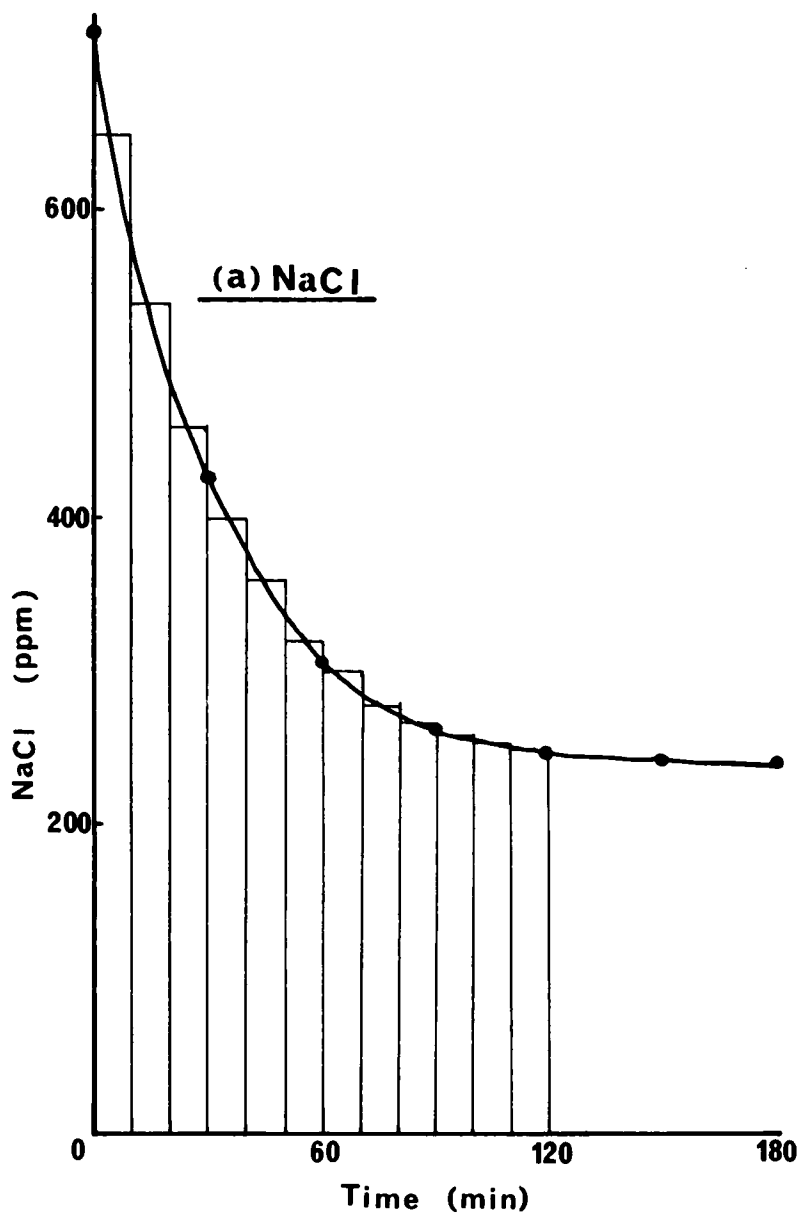


図 4 - 24 (a)流出水濃度の時間変化 (NaCl)

ほとんど見られず、変水層での濃度減少は連行現象が主であるが、深水層では水塊の混合によるものが主で反応による減少は小さいと考えられる。

第 5 節 相 似 則

貯水池の変動に伴う水質変化に関する模型実験を取り扱う場合、その実験結果の実際貯水池への適用には相似則の検討が必要である。すなわち、熱移動や物質移動の現象の他に、流動に関する水理学的な相似の条件が問題になる。一般に、実物と模型との両方に同じ流体を用いる限り、Reynolds 数と Froude 数を

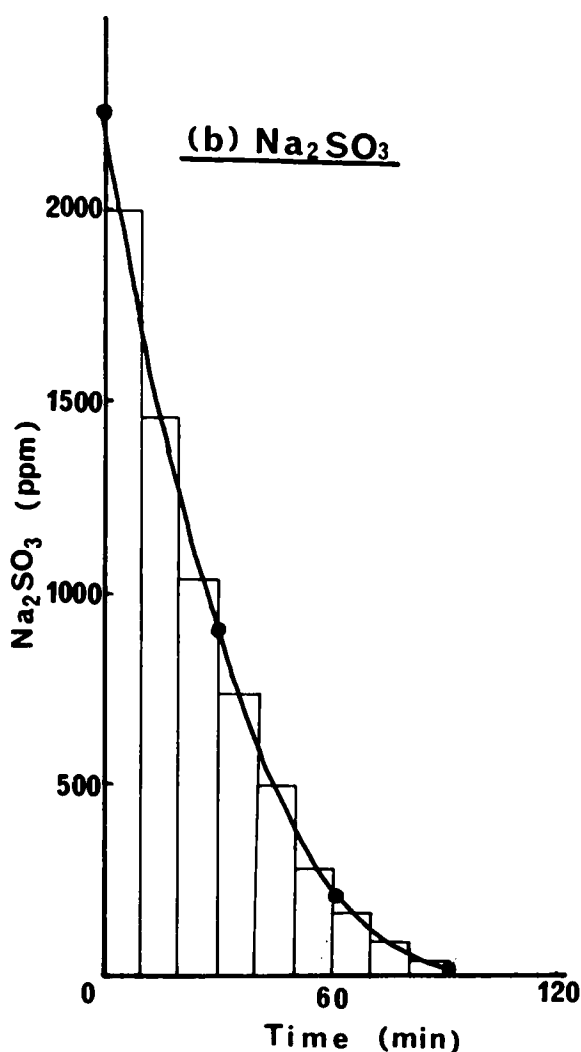


図 4-24 (b) 流出水濃度の時間変化 (Na_2SO_3)

同時に満足することはできない。すなわち、重力、慣性力、粘性力が同じ程度に支配的である現象の完備な模型実験は不可能である。したがって、この3つのうちの2つが支配的な作用として働き、残りの1つの影響は2次的に作用すると考えて、注目する現象の主要部分の要件を満たす相似をとることが多い。それゆえ、実物と模型との間に幾何学的相似が成立しているならば、自然水域におけるその現象は乱流場での熱移動および物質移動とみられるから、それぞれPr数とFr数、およびSc数とFr数を一致させればよいことになる。しかしながら、貯水池のように水平方向と鉛直方向の縮尺を同一にとった模型においてその現象を再現することが困難な場合は、どうしても水平方向と鉛直方向の縮尺を異にする歪模型を使用せざるを得ない。そしてこの歪模型によって、水塊や水質の混合・拡散現象をシミュレートする理論は完全に確立されたものではない⁷⁾。また、実際の現場で生ずる全ての現象をこの歪模型で再現させることは原理的にも不可能であるゆえ、おのずからその適用には限度があり、とくに影響の大きい現象のシミュレートに重点を置き、模型と現場で得られた結果の比較検討からその妥当性の評価によって、現象の定性的な

確認だけでなく定量的に実験精度の向上を目指すことになる。

とくに、歪模型は、その性質上、流動状態が水平面内での現象と見なしうる場合の妥当性が認められており¹⁾、温度成層状態下での各種の実験では密度の鉛直分布の再現性は確立されているから、温度躍層部分における流動現象に焦点を合わせればよいことになる。したがって、以下のように温度躍層面での現象に注目した取り扱いをすることになる。

まず、温度成層流の内部境界面の発達段階すなわち成層状態によって、躍層面または内部境界面を $d^2\rho/dz^2=0$ の面であるとする定義に従い、その状態が密度の鉛直分布から少なくとも1点存在する場合と、存在しない場合の2つに分ける。前者において、躍層面が2つ以上存在する多層の場合もあるが、ここでは最も popular で、かつ重要でもある主躍層が1つ存在する2層流の場合を対象として考え、3層以上の場合もこれに準じて取り扱い得るので省略することにする。

(1) 躍層が存在しない場合

この場合の流動状態は、鉛直方向によく混合されており、水質的にもほぼ一様に近い状態と考え、流下方向に水深の漸増する開水路流れとして取り扱うことになる。そして、流下方向に比較的長い水路区間における流れのマクロな挙動が問題になるので、模型実験においても、水路断面内の流れの局所的な現象よりもその積分値あるいは平均量の1次元の挙動を考えることになる^{8,9)}。

まず、力学的相似律として、ゆるやかな一様水路の平均流に関する連続方程式と運動方程式を、実物と模型の両方について示すと、以下の式になる。

$$\text{模型:} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial A_m}{\partial t_m} + \frac{\partial}{\partial x_m} (A_m v_m) = 0 \end{array} \right. \quad (4-1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -i_m + \frac{\partial h_m}{\partial x_m} + \frac{n_m^2 v_m}{R_m^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x_m} \left(\frac{\alpha_m v_m^2}{2g} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial v_m}{\partial t_m} = 0 \end{array} \right. \quad (4-2)$$

$$\text{実物:} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial A_p}{\partial t_p} + \frac{\partial}{\partial x_p} (A_p v_p) = 0 \end{array} \right. \quad (4-3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -i_p + \frac{\partial h_p}{\partial x_p} + \frac{n_p^2 v_p}{R_p^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x_p} \left(\frac{\alpha_p v_p^2}{2g} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial v_p}{\partial t_p} = 0 \end{array} \right. \quad (4-4)$$

ここで、 $\left\{ \begin{array}{ll} A : \text{流水断面積,} & h : \text{水深,} \\ v : \text{断面平均流速,} & \alpha : \text{運動量(補正)係数,} \\ i : \text{水路床勾配,} & R : \text{径深,} \\ n : \text{粗度係数,} & \rho, m : \text{実物と模型を表わす添字,} \end{array} \right.$

運動の基礎方程式の適用がその現象に対して可能な場合、その相似条件は同一方程式のそれぞれの各対応項が比例関係にあることが必要であり、これより模型の各縮尺を求めることになる。上記二組の基礎方程式より得られる条件はつぎのとおりである。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{K_A}{K_t} = \frac{K_A \cdot K_v}{K_x} \\ K_i = \frac{K_h}{K_x} = \frac{K_n^2 \cdot K_v^2}{K_R^{\frac{2}{3}}} = \frac{K_a \cdot K_v^2}{K_x} = \frac{K_v}{K_t} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (4-5) \\ (4-6) \end{array}$$

ただし、 K は各添字の量の縮尺である。

重力加速度 g は、実物および模型とも同じ値としている。さらに、 $\alpha \doteq 1$ より K_a は満たされていると考え、上式(4-5)～(4-6)は次式となる。

$$K_i = \frac{K_h}{K_x} = \frac{K_n^2 \cdot K_v^2}{K_R^{\frac{2}{3}}} = \frac{K_v^2}{K_x} = \frac{K_v}{K_t} \quad (4-7)$$

上式(4-7)の2番目と4番目の比より、 $K_v = \sqrt{K_h}$ が導かれるが、これは $\frac{K_v}{\sqrt{K_h}} = 1$ 、すなわち、Froude の相似律であり、¹⁰⁾ 粗さ係数として摩擦に係する項を含んでいる。したがって、未知数が7個で方程式が4個ゆえ、差し引き3個の縮尺が自由に選べる。また、定流の場合は上式(4-7)において最後の項が消え、未知数と方程式がそれぞれ1個ずつ減るが、その結果は不変である。

(2) 躍層が存在する場合

この躍層面を内部境界面として上下2層に分け、その2成層流の上層において、(1)の場合と同様に運動の基礎方程式を立てて力学的相似律を求める¹⁰⁾。この基礎方程式のうち、連続方程式は(1)の場合と同じであるが、もう一方の運動方程式は、流れが重力と粘性力を driving force としている場合、鉛直方向に平均した流下方向の平均流速を v として1次的に考えると、以下のようになる¹¹⁾。

$$\text{模型: } \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial A_m}{\partial t_m} + \frac{\partial}{\partial x_m} (A_m v_m) = 0 \end{array} \right. \quad (4-8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v_m}{\partial t_m} + \frac{\partial}{\partial x_m} \left(\frac{\alpha_m v_m^2}{2g} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_m}{\partial x_m} - \frac{C_m}{2h_m} v_m^2 \end{array} \right. \quad (4-9)$$

$$\text{実物: } \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial A_p}{\partial t_p} + \frac{\partial}{\partial x_p} (A_p v_p) = 0 \end{array} \right. \quad (4-10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v_p}{\partial t_p} + \frac{\partial}{\partial x_p} \left(\frac{\alpha_p v_p^2}{2g} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_p}{\partial x_p} - \frac{C_p}{2h_p} v_p^2 \end{array} \right. \quad (4-11)$$

ここで、 $\frac{\partial p}{\partial x} = \rho g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$ 、 p : 圧力、 ζ : 水面上昇量、 C : 摩擦係数

実物と模型の両方の現象が力学的相似であるための条件として、上記二組の各式の各対応項の比が等しいことから、(1)の場合と同様の添字つき縮尺記号を用いると次式が成立する。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{K_A}{K_t} = \frac{K_A \cdot K_v}{K_x} \end{array} \right. \quad (4-12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{K_v}{K_t} = \frac{K_a \cdot K_v^2}{K_x} = \frac{K_c}{K_x} = \frac{K_c \cdot K_v^2}{K_h} \end{array} \right. \quad (4-13)$$

(1)の場合と同様に、 $K_a = 1$ はほぼ満たされたとし、さらに $K_h = K_c$ とすると、

$$K_t = \frac{K_x}{\sqrt{K_h}}, \quad K_c = \frac{K_h}{K_x}. \quad (4-14)$$

この $K_t = \frac{K_x}{\sqrt{K_h}}$ は $\frac{K_x}{K_t} = K_v = \sqrt{K_h}$ より Froude の相似律であり、 $K_c = \frac{K_h}{K_x}$ は粗度の相似である。

この場合、上層に注目しているから、粗度の相似としては、内部境界面（躍層面）の上下における剪断流れ（shear flow）によって生ずる内部摩擦を考え、その内部摩擦係数として扱えることができる。この内部摩擦係数は内部境界面の傾きや、流速、さらに水深などによって求めることができる。同じ密度成層流現象である塩水楔の問題では、その淡塩水境界面における混合過程として多くの人たちによって研究されており、例えば¹²⁾、

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_i = C_i \cdot \frac{\rho_2 u_1^2}{2} \end{array} \right. \quad (4-15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_i = - \left\{ \left(1 - \frac{u_1^2}{\epsilon g h_1} \right) / \left(\frac{u_1^2}{2 g h_1} \cdot \frac{h}{h - h_1} \right) \right\} \frac{\partial h}{\partial x} \end{array} \right. \quad (4-16)$$

ここで、 u_1 ：上層の平均流速、 h ：全水深、 h_1 ：上層の水深、 ρ_2 ：下水層の密度、 $\epsilon = \Delta\rho/\rho$ である。したがって、 C_i は上式(4-16)のように内部境界面での剪断抵抗 τ_i から求められている。この温水と冷水の内部境界面における内部摩擦係数についても、淡塩水二層流の場合と流体力学的機構は同じであり、同様の実験によってその値を求めることができると考えられる。

また、三層以上に分けられる多層流の場合、すなわち、躍層が2つ以上存在する場合でも、その最上層である表水層については上記の結果をそのまま利用できるものとする。

第6節 結 語

この章においては、実際の貯水池の観測では確認できない流動と水質の分布関係を、模型実験によって明らかにし、解析モデル確立のための基礎とするとともに、解析結果の実験検証に適用することを目的とし、実際現象への適用のために相似則の検討を行なった。第1節では実験の概要を述べ、第2節においては、著者の考案による底面冷却方式による水温成層の実験装置に触れ、第3節では、水温変化に注目した実験、浮遊性物質の挙動に注目した実験、溶解性物質と層境界面での混合過程に注目した実験の、方法、条件などについて詳述している。第4節においては、その実験結果の整理をしている。すなわち、水温変化を中心とした実験においては、流速分布と水温分布、とくに温度躍層との相対的な関係の把握として、流量増加、取水（放流）位置の低下は温度躍層の低下と比例関係にあることなどの結果を得ている。また、浮遊性物質の挙動に関する実験では、浮遊性物質の沈降速度による挙動の相違や、成層状態下での濃度変化の平衡状態化の傾向、温度躍層付近における浮遊性物質の滞留現象を確認している。さらに溶解性物質の挙動に関する実験では、その温度躍層付近における水塊あるいは水質の混合過程から、層境界面を通し

ての物質移動の定量的な把握ができ、解析モデルの境界条件の基礎が得られた。第5節では、模型貯水池実験槽が歪模型であることを考慮した相似則について検討し、その実験結果の実際現象への適用の足がかりを得ている。

参 考 文 献

- 1) 石原藤次郎・本間 仁編：「応用水理学 下」－水理実験－ pp. 14～15, pp. 61～68 丸善 (1971)
- 2) 合田 健, 海老瀬潜一：「水質の変化とその予報に関する研究(2)－貯水池の水温変化予知への拡散モデルの適用と相似則－」 第6回衛生工学研究討論会(土木学会)講演論文集 pp. 130～139 (1970)
- 3) 松原 茂：「密度成層をなす貯水池からの取水に関する水槽実験」 水温の研究 Vol. 3, No. 3, pp. 47～51 (1959)
- 4) 合田 健, 海老瀬潜一：「水質の変化とその予報に関する研究(4)－成層流における水質変化について－」 第9回衛生工学研究討論会(土木学会)講演論文集 pp. 208～215 (1973)
- 5) 合田 健, 海老瀬潜一：「貯水池の流動と水質との関係について」 第18回水理講演会(土木学会)講演集 pp. 193～198 (1974)
- 6) 松原 茂：「貯水池取水口付近の躍層の上昇についての観測」 水温の研究 Vol. 3, No. 3, pp. 45～47 (1959)
- 7) 大西外明：「温水拡散模型実験の相似性について」 発電水力 No. 121, pp. 62～68 (1972)
- 8) 林 泰造：「非定常水理の相似律」 流体模型相似律セミナー(日本学術会議)(1966)
- 9) 足立昭平：「移動河床水理の相似律」 流体模型相似律セミナー(日本学術会議)(1966)
- 10) 高月豊一, 南 勲：「温水取水施設模型実験における相似則について」 水温の研究 Vol. 3, No. 3, pp. 1～11 (1959)
- 11) 井上頼輝, 樋口明生：「航空写真と模型実験による某湾汚染の予知実験」 第4回衛生工学研究討論会(土木学会)講演論文集 pp. 83～89 (1967)
- 12) 金子安雄：「流路の水深が変化する場合の塩水楔の機構」 港湾技術研究所報告 Vol. 4, No. 5 pp. 2～20 (1965)

第5章 貯水池の水質変化と富栄養化の解析的研究

第1節 概 説

貯水池の水質汚濁や富栄養化の現象を含めた水質変化の機構を明らかにするには、実際の貯水池の観測による現象の把握、そして、現象を単純化した模型実験による検討、さらに、現象のモデル化による解析的考察によることになる。この解析的研究は、貯水池のフロー・パターンに基くモデルの構成に従った拡散方程式によるものが中心となり、富栄養化傾向の把握には時系列による統計解析を加えている。そして、その両者によって、生態系と水質の変化の関係を、植物プランクトンを例にとって解析を行なった。この時系列による水質変化の予測は、さらに新しいデータを加えることによって精度を向上させた将来予測に役立つものと思われる。すなわち、貯水池の水質変化は、水温変化を主とする循環と停滞（成層）のパターンの繰り返しに対応しており、このことは実際貯水池の観測や模型実験を通して確認できる。したがって、第2章第1節の6区分の分類をさらに整理して夏季停滞期、春季および秋季部分循環期、冬季循環期の3つに分けられる。すなわち、それぞれ温度躍層が2個、1個存在する場合、温度躍層が存在しない場合に相当する。さらに、温度躍層が1つ存在し、かつその温度躍層強さが強大で、変水層厚さが薄い場合は表水層と深水層の2層状態と考えることができる。したがって、水質変化の解析モデルとして図5-1に示す4つの基本パターンを考えることになる。この4つの基本パターンを中心に、これらを連結することにより、水温の周年変化の過程を表わしうるとして、以下の考察を進めることにする。例えば、千苺貯水池では冬季からの1年周期が、(i)温度躍層が存在しないような場合（図5-1で(d)）、(ii)温度躍層が1個存在する3層状態の場合（(a)）、(iii)温度躍層が2個存在する3層状態の場合（(c)）、(iv)温度躍層が1個存在する3層状態の場合（(a)）、(v)温度躍層が存在しないような場合（(d)）、と見なすことができ(ii)と(v)の場合に温度躍層をはさんで2層状態の(b)の場合が入ることがある。

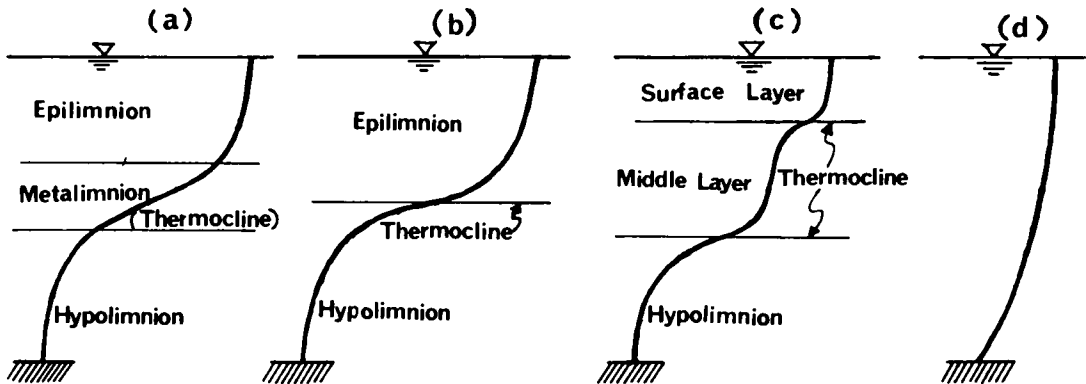


図5-1 解析モデル

この章においては、まず他の水質因子に支配的な水温変化の理論解析と統計解析を行ない、つぎに汚濁物

質の挙動を浮遊性物質と溶解性物質に分けて拡散方程式による理論解析を行なう。そして、その拡散方程式による理論解析に、観測結果の統計解析結果を加えて、植物プランクトンを例とする、生態系と環境条件の変化との対応関係の解析を行なっている。

第2節 水 温

水温の周年変化の全体的な把握は、第2章第2節の図2-2のように等温度線(isothermal line)の変化の解析から行なうことができる。すなわち、各水深ごとに1年サイクルの水温変化をプロットすると、第3章第3節のように、7～8月を山、1～2月を谷とする正弦関数形状(sinusoidal curve)の変化を示すのが通常である。^{1), 2)} この水温変化特性に注目し、何年かの各水深ごとの水温周年変化の資料が蓄積されている場合には、周年変化の調和分析によって経験的な水温変化パターンを河川や湖沼を含めて統計的に求めることができる。その例として、水位変動の安定している千叡貯水池の場合は、第3章で記したように、温度躍層部を除き、各水深ともその変化の90%前後が1年を周期とする余弦関数で表現できる。

そして、この1年を周期とする水深ごとの余弦関数の、平均値、振幅、初期位相角に注目して、それぞれの水深方向の変化から水温変化特性を明らかにすることができる。また、これを流下方向の各地点ごとに行なうと、貯水池全体の熱収支の変化を把握することができ、これから各貯水池の水温変化に基く貯水池の形態特性の分類へと向かうことも可能である。とくに、ダム貯水池の特性として、取水あるいは放流位置によっては、その中間流の温度躍層部への影響が大きく、1年を周期とする余弦関数の振幅が大きくなり、水温変化をカバーできる割合が減少することがある。

この統計的解析を千叡貯水池のデータをもとに進めてみる。

水温の調和分析の結果を、膳棚地点について表5-1に示し、その関数近似式による水温の計算値を表5-2に示す。この調和分析の結果のうちで12カ月(1年)周期が最も意味があり、これによってカバーされる水温変化は80～95%のことが多い。この1年周期の調和波について、各地点ごとに、その系列平均値、系列分散、振幅および初期位相角の水深による変化をプロットしたものが図5-2(a)(b)(c)(d)である。これより、主躍層が存在する15～18m以上の水深を除いて、平均値、分散、振幅、初期位相角のいずれも水深に対して直線的に変化することがわかる。それを各地点について、定式化したものが表5-3である。水温の平均値については、水深に関して一次式で示される切片および勾配が流下方向に対してほとんど一定とみなせる。振幅については、切片は流下方向に対してほとんど同じであるが、勾配の負の値が流下方向に大きくなる。さらに、初期位相角については、取水塔前、膳棚、郡界地点は切片および勾配ともほとんど同じであり、水位変動の影響の最も大きい合流点の勾配が逆転している。したがって、時間 t 月、流下距離 x km、水深 z mの水温 θ ($^{\circ}\text{C}$)の変化の経験式は次式で表わされる。

$$\theta(^{\circ}\text{C}) = 17.2 + \{ 11.1 - 0.013 x^2 + 0.035 x - 0.333 \} \times \cos \left\{ \frac{\pi}{6} t - (1.91 + 0.033 t) \right\} \quad (5-1)$$

ここでも、 t は4月を $t=0$ にとっており、 x は流下距離で、合流点を $x=0$ としている。

以上のような観測資料に基く統計解析によるアプローチは、水温変化機構の全般的な解明に役立つ

表5-1 水温の調和分析結果（磨棚地点）

水深(m)	系列 平均値	12ヵ月周期			6ヵ月周期			4ヵ月周期			3ヵ月周期		
		振 幅	位相角	分散比	振 幅	位相角	分散比	振 幅	位相角	分散比	振 幅	位相角	分散比
0	17.336	65.900	1.903	93.4	0.769	6.277	0.4	1.325	0.313	1.3	0.794	1.714	0.5
1	17.002	63.542	1.923	93.6	0.719	6.264	0.4	1.289	0.365	1.3	0.845	1.698	0.6
3	15.992	54.124	1.995	91.6	1.028	6.155	1.0	1.220	0.499	1.4	0.867	1.846	0.7
5	14.965	46.992	2.084	83.7	1.556	6.246	2.6	1.140	0.959	1.4	0.925	2.636	0.9
8	13.991	35.345	2.163	93.4	1.235	0.210	2.2	0.240	1.880	0.1	0.168	4.071	0.0
10	13.183	29.596	2.221	93.0	1.208	0.309	2.5	0.240	2.667	0.1	0.230	4.622	0.1
13	11.971	23.372	2.290	86.7	0.832	0.603	1.5	0.485	4.490	0.5	0.085	5.493	0.0
15	11.864	24.824	2.392	58.1	0.731	0.541	1.1	0.635	4.737	0.8	0.275	6.168	0.2
18	10.847	19.462	2.567	30.6	0.770	0.893	1.5	0.732	4.828	1.4	0.356	0.038	0.3
20	8.954	10.824	2.690	17.3	0.525	1.033	3.0	0.240	5.825	0.6	0.074	4.512	0.1
23	7.686	4.527	1.217	53.9	0.037	5.204	1.9	0.029	0.315	1.2	0.027	0.489	1.1
備 考	単位：℃，位相角はラジアン，分散比は％である。												

表5-2 水温の近似式による計算値（膳棚地点）

月 水深(m)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
0	15.635	20.972	2.335	26.531	29.843 [△]	25.884	20.348	15.936	10.312	6.376	5.543 [○]	8.317
1	15.055	20.449	21.740	25.954	29.386 [△]	25.539	20.172	15.808	10.177	6.398	5.482 [○]	7.863
3	13.667	18.817	19.566	23.144	27.432 [△]	24.745	19.720	15.674	10.091	6.165	5.475 [○]	7.406
5	12.014	17.509	18.011	19.394	24.553 [△]	24.374	19.407	15.461	10.298	5.808	5.507 [○]	7.245
8	10.827	14.566	16.940	19.388	21.421	21.732 [△]	19.953	15.223	9.944	6.360	5.061 [○]	6.676
10	9.608	13.061	16.217	17.807	19.247	20.600 [△]	19.018	14.716	10.052	6.217	4.956 [○]	6.698
13	8.415	10.930	14.217	16.608	17.275	17.481 [△]	17.017	14.350	9.902	6.083	5.000 [○]	6.374
15	8.847	10.129	12.956	15.806	16.212	16.343	16.680 [△]	14.549	10.579	7.216	5.909 [○]	7.141
18	8.874	9.143	11.025	13.319	13.072	13.094	14.493 [△]	13.736	10.842	8.117	6.763 [○]	7.661
20	8.296	8.614	8.975	9.323	9.626	9.912	10.120	10.233 [△]	9.586	8.017	7.121 [○]	7.626
23	7.822	7.824	7.790	7.865 [△]	7.856	7.742	7.633	7.507	7.462 [○]	7.519	7.553	7.658
備考	各水深での最高水温△，最低水温を○で示す。単位はすべて℃である。											

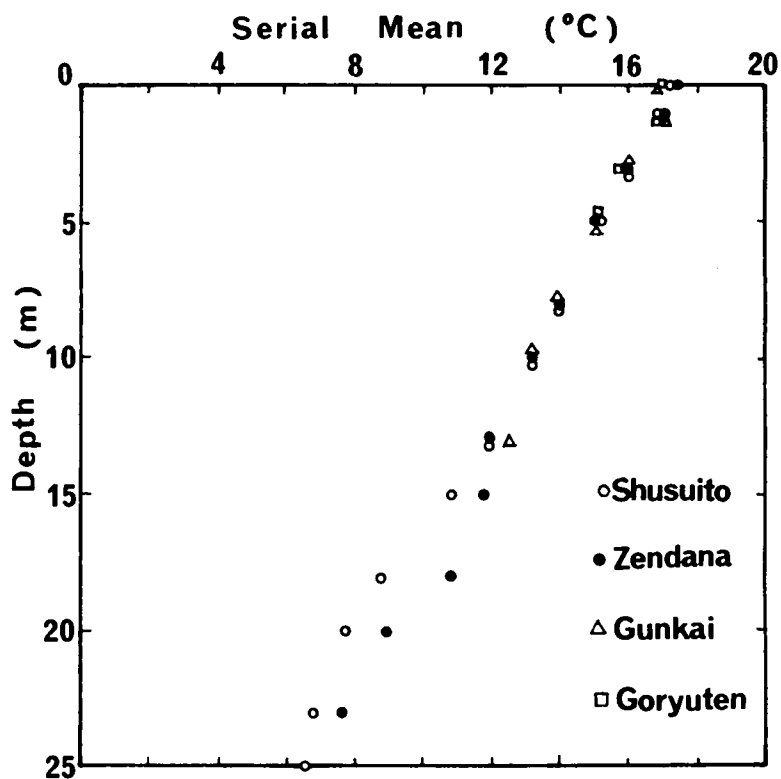


図 5 - 2(a) 水温の系列平均値の鉛直分布

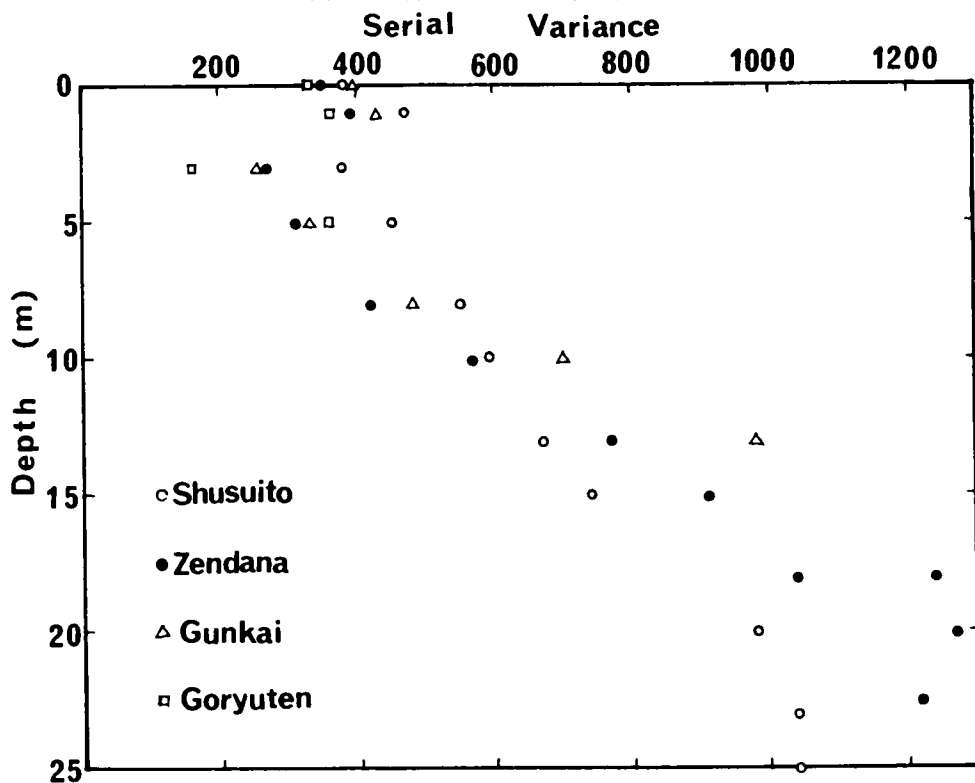


図 5 - 2(b) 水温の系列分散の鉛直分布

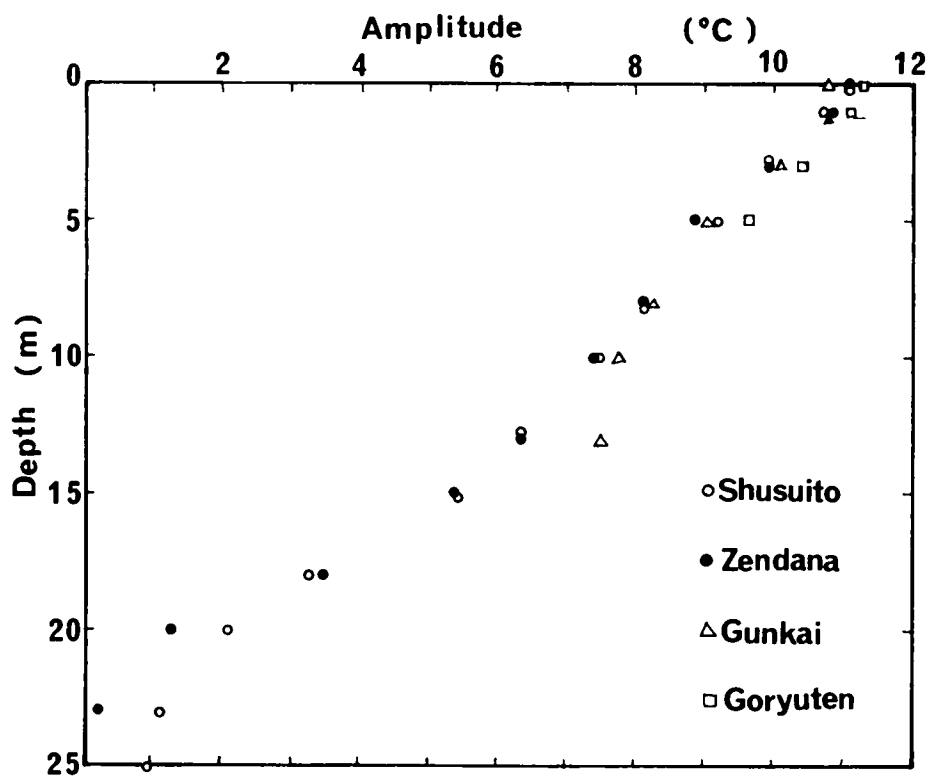


図 5 - 2(c) 水温の振幅の鉛直分布

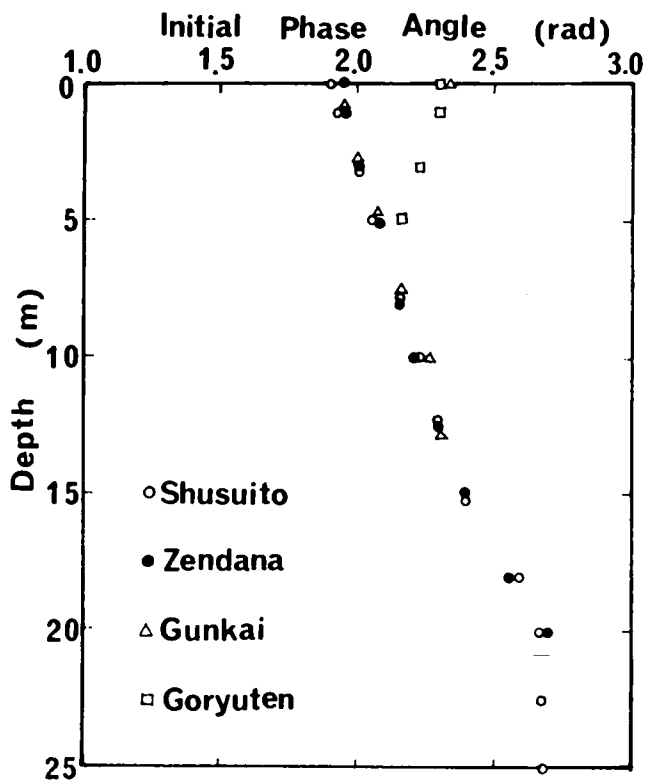


図 5 - 2(d) 水温の初期位相角の鉛直分布

表 5-3 水温と水深の関係

	取水塔前	膳棚	郡界	合流
平均値	$17.25 - 0.417 \times z$	$17.25 - 0.421 \times z$	$17.10 - 0.389 \times z$	$17.10 - 0.400 \times z$
振幅	$11.1 - 0.467 \times z$	$11.15 - 0.375 \times z$	$10.90 - 0.313 \times z$	$11.35 - 0.333 \times z$
位相角	$1.91 + 0.0333 \times z$	$1.91 + 0.0328 \times z$	$1.91 + 0.0333 \times z$	$2.300 - 0.0273 \times z$

(z は水深で m 単位)

が、さらにその成果もふまえて、その機構の直接的な解明には、熱移動現象論的なアプローチが必要である。すなわち、貯水池を black box と考える大まかな取扱ひ法^{3), 4)}ではなく、完全停滞期、完全循環期などの明確なパターン分けを行い、その各パターンにおいての水温変化の理論解析が有効であると考えられる。そのパターンを前述の図 5-1 の 4 つの解析モデルに分けて行ない、水温変化の基本方程式は次式とする。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = E_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + E_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{Q}{\rho c_p H} \quad (5-2)$$

ここで、 c は比熱 (定圧) であり、 Q は熱量であり、 H は表水層で一様に温められる水体の厚さであり、その境界条件は以下のように考える。まず、水表面での熱移動は、放射、伝導、対流および蒸発・凝縮のように熱移動のし方によって異なり、いくつかの形に分けられる。放射は、波長によって一定の水深まで瞬間的に到達し、表面付近の水塊は風などによる乱れがあれば短時間のうちにほぼ一様な水温の水塊になることが多い。したがって、放射による加熱あるいは逆の冷却は、式 (5-2) の右辺第三項の湧源項あるいは汲源項として加えられることが多い。^{5), 6)} 伝導および対流によるものは顕熱の交換 (H) として、水表面上の大気温と水表面水温の差に比例する flux によって、次式で表わされる。⁷⁾

$$H = c_a \cdot \rho' \cdot K_a \cdot \frac{d\theta_a}{dz} = h(\theta_a - \theta_w) \quad (5-3)$$

ここで、 c_a 、 ρ' 、 K_a 、 θ_a はそれぞれ大気の比熱、密度、熱伝導係数、温度であり、 h は熱伝達係数、 θ_w は表面水温である。

また、蒸発および凝縮によるものは潜熱交換 (LE) として、飽和水蒸気圧差によって次式で表わされる。

$$\begin{aligned} LE &= \rho' \cdot K_a \cdot \frac{dq}{dz} = 1.5 h(e_a - e_w) = 1.5 h \left\{ e_a - e_{as} + \frac{de}{d\theta} / \theta_a (\theta_w - \theta_a) \right\} \\ &= 1.5 h \left\{ \frac{de}{d\theta} / \theta_a (\theta_w - \theta_a) - D' \right\} \end{aligned} \quad (5-4)$$

ここで、 q は比湿であり、 e_a と e_w はそれぞれ空気中の水蒸気圧、表面水温に対する飽和蒸気圧であり、 $D' (= e_{as} - e_a)$ は飽差であり、 $\frac{de}{d\theta} / \theta_a$ は気温 θ_a に対する飽和蒸気圧 e_{as} の変化率である。

また、放射量 Q は次式 (5-5) で表わされる。

$$Q = (1 - A_0) I_0 + R_N \quad (5-5)$$

ここで、 $\sqrt{\text{反射率}}$ 、 I_0 は日射量、 R_N は正味の長波放射量である。さらに、池底面を通じての熱交換は、池底面から常に一定の熱量が出入りする場合と、池底面の水温 θ_w 、池底土の温度を θ_e として熱移動が

その温度差に比例する場合とが考えられる。これらは次式で表わすことができる。⁶⁾

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{Q}{\rho c_p E_z}, \text{ or } h'(\theta_w - \theta_c) \quad (5-6)$$

ここで、 Q は熱量を表わし、 E_z は拡散係数である。

以下、これらの条件で成層の有無あるいは、成層強度および温度躍層数によって分けた場合について考えることにする。

(1) 二層状態

表水層と深水層において、それぞれの物理量に suffix 1, 2 をつけて熱拡散方程式を立て、以下のような境界条件および初期条件のもとで解析解^{9), 10)}を考える。

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{水表面 } (z = -h_1) \text{ において,} & \frac{\partial \theta_1}{\partial z} = \frac{-Q_1}{\rho c_p E_{z1}} = G_1 \\ \text{池底面 } (z = h_2) \text{ において,} & \frac{\partial \theta_2}{\partial x} = \frac{-Q_2}{\rho c_p E_{z2}} = G_2 \\ \text{躍層面 } (z = 0) \text{ において,} & \theta_1 = \theta_2, \text{ かつ, } E_{z1} \frac{\partial \theta_1}{\partial z} = E_{z2} \frac{\partial \theta_2}{\partial z} \\ \text{流入端 } (x = 0) \text{ において,} & \theta_1 = a_1, \quad \theta_2 = a_2 \end{array} \right.$$

$$u_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial x} = E_{z1} \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial z^2} \quad u_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial x} = E_{z2} \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial z^2} \quad (5-7)$$

$$\theta = \Theta + a, \quad \frac{E_z}{u} = E' \text{ とすると,}$$

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial x} = E'_1 \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial z^2} \quad \frac{\partial \theta_2}{\partial x} = E'_2 \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial z^2} \quad (5-8)$$

x を t と考えて Laplace 交換を行うと,

$$\bar{\theta}_1(s) = A e^{-q_1 z} + B e^{q_1 z} \quad \bar{\theta}_2(s) = A e^{-q_2 z} + B e^{q_2 z} \quad (5-9)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} z = -h_1 \text{ において,} & \frac{d\bar{\theta}_1(s)}{dz} = \frac{G_1}{s} \\ z = h_2 \text{ において,} & \frac{d\bar{\theta}_2(s)}{dz} = \frac{G_2}{s} \\ z = 0 \text{ において,} & \bar{\theta}_1(s) = \bar{\theta}_2(s) + \frac{\theta_0}{s}, \text{ かつ, } \frac{d\bar{\theta}_1(s)}{dz} = K^2 \frac{d\bar{\theta}_2(s)}{dz} \end{array} \right.$$

$$\text{ここで, } \theta_0 = a_1 - a_2, \quad K^2 = E_{z2}/E_{z1}, \quad q_1 = \sqrt{\frac{s}{E'_1}}, \quad q_2 = \sqrt{\frac{s}{E'_2}}$$

これらの条件より係数 A, B, C, D を定めると,

$$\left\{ \begin{aligned} A &= \frac{\frac{-G_1}{q_1 s} \{ (e^{-2q_2 h_2} + 1) + K(1 - e^{-2q_2 h_2}) \} e^{-q_1 h_1} + \frac{2G_2}{q_2 s} K e^{-2q_1 h_1 - q_2 h_2}}{- (1 + e^{-2q_2 h_2}) (e^{-2q_1 h_1} - 1) + K(1 - e^{-2q_2 h_2}) (e^{-2q_1 h_1} + 1)} + \frac{\theta_0}{2s} \\ B &= \frac{\frac{-G_1}{q_1 s} \{ (e^{-2q_2 h_2} + 1) + K(e^{-2q_2 h_2} - 1) \} e^{-q_1 h_1} + \frac{2G_2}{q_2 s}}{- (1 + e^{-2q_2 h_2}) (e^{-2q_1 h_1} - 1) + K(1 - e^{-2q_2 h_2}) (e^{-2q_1 h_1} + 1)} + \frac{\theta_0}{2s} \\ C &= \frac{-\frac{2G_1}{q_1 s} e^{-q_1 h_1} + \frac{G_2}{q_2 s} \{ (e^{-2q_1 h_1} - 1) + K(1 + e^{-2q_1 h_1}) \} e^{-q_2 h_2}}{- (1 + e^{-2q_2 h_2}) (e^{-2q_1 h_1} - 1) + K(1 - e^{-2q_2 h_2}) (e^{-2q_1 h_1} + 1)} \\ D &= \frac{-\frac{2G_1}{q_1 s} e^{-2q_2 h_2 - q_1 h_1} + \frac{G_2}{q_2 s} \{ (1 - e^{-2q_1 h_1}) + K(e^{-2q_1 h_1} + 1) \} e^{-q_2 h_2}}{- (1 + e^{-2q_2 h_2}) (e^{-2q_1 h_1} - 1) + K(1 - e^{-2q_2 h_2}) (e^{-2q_1 h_1} + 1)} \end{aligned} \right\} \quad (5-10)$$

ここで、 $p_1 = \exp\{-2h_1 \sqrt{\frac{s}{E_{z_1}}}\}$ 、 $p_2 = \exp\{-2h_2 \sqrt{\frac{s}{E_{z_2}}}\}$ とおき、 $K = \sqrt{\frac{E_{z_2}}{E_{z_1}}}$ より $\frac{q_2}{q_1} = \frac{1}{K}$

より、係数 A, B, C, D の共通分母を ξ とすると、

$$\xi = -(1 + p_2)(p_1 - 1) + K(1 - p_2)(p_1 + 1) = (1 + K)[1 - \{p_1 p_2 + \frac{1-K}{1+K}(p_1 - p_2)\}] \quad (5-11)$$

一般に、 $E_{z_1} > E_{z_2}$ であるから、 $0 < K < 1$ 、また、 $0 < p_1, p_2 < 1$ より $0 < \alpha (= \frac{1-K}{1+K}) < 1$

ゆえに、 $p_1 > p_2$ のとき、 ξ の係数は $1 - \{p_1 p_2 + \alpha(p_1 - p_2)\} > (1 + p_2)(1 - p_1) > 0$ また、 $p_1 > p_2$ のときも同様である。したがって、

$$\frac{1}{\xi} = \frac{1}{1+K} [1 - \{p_1 p_2 + \alpha(p_1 - p_2)\}]^{-1} = \frac{1}{1+K} \sum_{n=0}^{\infty} [p_1 p_2 + \alpha(p_1 - p_2)]^n \quad (5-12)$$

このままでは解析解は得られず、以下の特別な場合のみ解を得ることができる。

(i) $h_2 \gg h_1$ の場合

この場合は $h_2 \rightarrow \infty$ 、これは K_2 が一般に小さく、 $p_2 \rightarrow 0$ と同値である。したがって、

$$\frac{1}{\xi} = \frac{1}{(1+K)(1-\alpha p_1)} = \frac{1}{1+K} \sum_{n=0}^{\infty} (\alpha p_1)^n = \frac{1}{1+K} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n e^{-2nq_1 h_1} \quad (5-13)$$

これより係数 A, B, C, D を求めると、基本式は、

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{\theta}_1(s) &= \left[-\frac{G_1}{q_1 s} \{ (e^{-q_1(h_1+z)} + e^{-q_1(h_1-z)}) - K(e^{-q_1(h_1+z)} - e^{-q_1(h_1-z)}) \} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n e^{-2nq_1 h_1} \right] \\ &\quad + \frac{\theta_0}{2s} (e^{q_1 z} + e^{-q_1 z}) \end{aligned} \right\}$$

$$\left[\bar{\theta}_2(s) = \frac{-2\sqrt{E_1} G_1}{s^2} \cdot \exp \left[-\sqrt{s} \left\{ \frac{(2n+1)h_1}{\sqrt{E_1}} + \frac{z}{\sqrt{E_2}} \right\} \right] \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \right] \quad (5-14)$$

逆変換して、

$$\left\{ \begin{aligned} \theta_1 &= \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \left[-G_1 \left\{ \left(2 \left(\frac{E_1' x}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{[(2n+1)h_1+z]^2}{4E_1' x}} - [(2n+1)h_1+z] \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)h_1+z}{2\sqrt{E_1' x}} \right\} \right. \right. \\ &\quad \cdot (1+K) + \left(2 \left(\frac{E_1' x}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{[(2n+1)h_1-z]^2}{4E_1' x}} - [(2n+1)h_1-z] \operatorname{erfc} \frac{[(2n+1)h_1-z]}{2\sqrt{E_1' x}} \right) \\ &\quad \cdot (1+K) \left. \right\} + \frac{\theta_0}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \frac{-z}{2\sqrt{E_1 x}} - \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{E_1 x}} \right\} \\ \theta_2 &= \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \left[-2\sqrt{E_1} \cdot G_1 \left\{ 2 \left(\frac{x}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left\{ - \left(\frac{(2n+1)h_1}{\sqrt{E_1}} + \frac{z}{\sqrt{E_2}} \right) \right\} - \left(\frac{(2n+1)h_1}{\sqrt{E_1}} + \frac{z}{\sqrt{E_2}} \right) \right. \right. \\ &\quad \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{(2n+1)h_1}{\sqrt{E_1}} + \frac{z}{\sqrt{E_2}} \right) \left. \right\} \left. \right] \end{aligned} \right\} \quad (5-15)$$

(ii) 微小項の無視の場合

n が大きくなると、指数関数の $\exp \left[- \frac{\{(2n+1)h_1 \pm z\}^2}{4E_2 x} \right]$ や余誤差関数の $\operatorname{erfc} \frac{(2n+1)h_1 \pm z}{2\sqrt{E_2 x}}$

はいずれも 0 に近づき、 α も $0 < \alpha < 1$ より $\alpha^n \rightarrow 0$ となる。したがって、

$$\begin{aligned} \frac{1}{\xi} &= \frac{1}{1+K} \{ 1 + e^{-2(q_1 h_1 + q_2 h_2)} + \alpha (e^{-2q_1 h_1} - e^{-2q_2 h_2}) + e^{-4(q_1 h_1 + q_2 h_2)} + 2\alpha e^{-2(q_1 h_1 + q_2 h_2)} \\ &\quad \cdot (e^{-q_1 h_1} - e^{-q_2 h_2}) + \alpha^2 (e^{-2q_1 h_1} - e^{-2q_2 h_2})^2 + \dots \} \end{aligned} \quad (5-16)$$

であるから、 $n=2$ までとれば十分である。また、もう少し精度を落して $n=0, 1$ の 2 項とすると、

$$\frac{1}{\xi} = \frac{1}{1+K} \{ 1 + e^{-2(q_1 h_1 + q_2 h_2)} + \alpha (e^{-2q_1 h_1} - e^{-2q_2 h_2}) \} \quad (5-17)$$

この $\frac{1}{\xi}$ に対する係数 A, B, C, D を求めて、逆変換することは可能であるが、なお高次の項が残り、複雑な形になるだけで意味がなく、したがって、実際の上層（表水層）の厚さ h_1 と下層（深水層）の厚さ h_2 の大きさを考慮し、微小項を無視して $\bar{\theta}(s)$ を定め、(i) の場合と同様に逆変換すればよい。

(D) 三層状態

それぞれの層がその相互の内部境界面で $\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0$ という境界条件で接している場合、その 3 層の最上層（表水層）、中間層（変水層）、最下層（深水層）のそれぞれにおいて、熱拡散方程式 $u \frac{\partial \theta}{\partial x} = E_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}$ をその境界条件で解析的に解くことになる。ただし、表水面および底面において、その各種の熱移動のうちで、その時期に最も支配的なものによってその境界条件の形を決めることになる。ここで、解析解を得るために、 $D = \frac{E_z}{u} = \text{const.}$ の仮定を設ける。以下にその解析解を各層、各実験条件について示す。

(1) 最 上 層 (表水層)

(i)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{表水面 (} z=0 \text{) において,} \quad -\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{Q_1}{\rho c_p E_z} = -G_1 \text{ (} = \text{const.)} \\ \text{第 1 内部境界面 (} z=h_1 \text{) において,} \quad \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0 \\ \text{起点 (} x=0 \text{) において,} \quad \theta = a_0 z^2 + b_0 z + c_0 \end{array} \right.$$

$\theta - c_0 = \Theta$ において, (1)と同様に Laplace 変換によって,

$$\begin{aligned} \theta = & a_0 z^2 + b_0 z + c_0 + 2 D c_0 x - 2 D a_0 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left[\left\{ x + \frac{(2n+1)h_1 - z}{2D} \right\} \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)h_1 - z}{2\sqrt{Dx}} \right. \\ & - \left. \left\{ (2n+1)h_1 - z \right\} \cdot \left(\frac{x}{\pi D} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{\{(2n+1)h_1 - z\}^2}{4Dx}} + \left\{ x + \frac{(2n+1)h_1 + z}{2D} \right\} \operatorname{erfc} -\frac{(2n+1)h_1 + z}{2\sqrt{Dx}} \right. \\ & - \left. \left. \left\{ (2n+1)h_1 + z \right\} \cdot \left(\frac{x}{\pi D} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{\{(2n+1)h_1 + z\}^2}{4Dx}} + 2(b_0 - G_1)\sqrt{Dx} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \right. \right. \\ & \left. \left. \cdot \left\{ \operatorname{ierfc} \frac{2nh_1 + z}{2\sqrt{Dx}} - \operatorname{ierfc} \frac{2nh_1 - z}{2\sqrt{Dx}} \right\} \right] \end{aligned}$$

(5-18)

(ii)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{表水面 (} z=0 \text{) において,} \quad -\frac{\partial \theta}{\partial z} = \lambda_1 (\theta_a - \theta) \\ \text{第 1 内部境界面 (} z=h_1 \text{) において,} \quad \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0 \\ \text{起点 (} x=0 \text{) において,} \quad \theta = a_0 z^2 + b_0 z + c_0 \end{array} \right.$$

(i)と同様にして,

$$\begin{aligned} \theta = & a_0 z^2 + b_0 z + c_0 + 2 D a_0 x + \frac{-2(-\lambda_1)a_0}{D} \left[\frac{D}{(-\lambda_1)^3} e^{-\lambda_1(h_1-z)+Dx(-\lambda_1)^2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{h_1-z}{2\sqrt{Dx}} - \lambda_1\sqrt{Dx} \right\} \right. \\ & - \frac{D}{(-\lambda_1)^3} \sum_{r=0}^2 [-2(-\lambda_1)\sqrt{Dx} \operatorname{erfc} \frac{h_1-z}{2\sqrt{Dx}} - \frac{D}{(-\lambda_1)^3} e^{\lambda_1(h_1+z)+Dx(-\lambda_1)^2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{h_1+z}{2\sqrt{Dx}} - \lambda_1\sqrt{Dx} \right\} \\ & \left. + \frac{D}{(-\lambda_1)^3} \sum_{r=0}^2 [-2(-\lambda_1)\sqrt{Dx} \operatorname{erfc} \frac{h_1+z}{2\sqrt{Dx}} + \frac{2(-\lambda_1)a_0}{D^2} \left[\frac{D}{(-\lambda_1)^3} e^{-\lambda_1 z + Dx(-\lambda_1)^2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{z}{2\sqrt{Dx}} - \lambda_1\sqrt{Dx} \right\} \right. \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{D}{(-\lambda_1)^3} \sum_{r=0}^2 [-2(-\lambda_1)\sqrt{Dx}]^r i \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{Dx}} - \frac{D}{(-\lambda_1)^3} e^{-\lambda_1(2h_1-z)+Dx(-\lambda_1)^2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{2h_1-z}{2\sqrt{Dx}} - \lambda_1\sqrt{Dx} \right\} \\
& + \frac{D}{(-\lambda_1)^3} \sum_{r=0}^2 [-2(-\lambda_1)\sqrt{Dx}]^r i \operatorname{erfc} \frac{2h_1-z}{2\sqrt{Dx}} - 2a_0 \left[\frac{2}{(-\lambda_1)} \left(\frac{Dx}{\pi} \right) e^{-\frac{(h_1-z)^2}{4Dx}} - \frac{1-\lambda_1(h_1-z)}{(-\lambda_1)^3} \right. \\
& \cdot \operatorname{erfc} \left\{ \frac{h_1-z}{2\sqrt{Dx}} \right\} - \frac{1}{(-\lambda_1)^2} e^{-\lambda_1(h_1-z)+Dx(-\lambda_1)^2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{h_1-z}{2\sqrt{Dx}} - \lambda_1\sqrt{Dx} \right\} - \frac{2}{(-\lambda_1)} \left(\frac{Dx}{\pi} \right) e^{-\frac{(h_1+z)^2}{4Dx}} \\
& + \left. \frac{1-\lambda_1(h_1+z)}{(-\lambda_1)^2} \operatorname{erfc} \frac{h_1+z}{2\sqrt{Dx}} - \frac{1}{(-\lambda_1)^2} e^{-\lambda_1(h_1+z)+Dx(-\lambda_1)^2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{h_1+z}{2\sqrt{Dx}} - \lambda_1\sqrt{Dx} \right\} \right] \\
& + \{ b_0 - \lambda_1(\theta_a - c_0) \} \left[\frac{1}{(-\lambda_1)} \operatorname{erfc} \frac{h_1-z}{2\sqrt{Dx}} - \frac{1}{(-\lambda_1)} e^{-\lambda_1(h_1-z)+Dx(-\lambda_1)^2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{h_1-z}{2\sqrt{Dx}} - \lambda_1\sqrt{Dx} \right\} \right. \\
& \left. - \frac{1}{(-\lambda_1)} \operatorname{erfc} \frac{h_1+z}{2\sqrt{Dx}} + \frac{1}{(-\lambda_1)} e^{-\lambda_1(h_1+z)+Dx(-\lambda_1)^2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{h_1+z}{2\sqrt{Dx}} - \lambda_1\sqrt{Dx} \right\} \right] + \dots
\end{aligned}$$

(5-19)

(iii)

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{表水面 (} z=0 \text{) において,} & -\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{Q_1}{\rho c_p E_z} = -G_1 \text{ (= const.)} \\ \text{第1内部境界面 (} z=h_1 \text{) において} & \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0 \\ \text{起点 (} x=0 \text{) において,} & \theta = \theta_0 e^{-\frac{z}{h_1}} \end{array} \right.$$

(i) と同様にして,

$$\begin{aligned}
\theta &= \theta_0 e^{-\left(\frac{z}{h_1} + \frac{D}{h_1^2}x\right)} + 2G_1 \sqrt{Dx} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left\{ i \operatorname{erfc} \frac{2(n+1)h_1-z}{2\sqrt{Dx}} - i \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)h_1+z}{2\sqrt{Dx}} \right\} \\
&+ G_1 \theta_0 \sqrt{Dx} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left[e^{-\frac{1}{h_1} \{ 2(n+1)h_1-z \} + \frac{Dx}{h_1^2}} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{2(n+1)h_1-z}{2\sqrt{Dx}} - \frac{1}{h_1} \sqrt{Dx} \right\} - e^{-\frac{1}{h_1} \{ 2nh_1+z \} + \frac{Dx}{h_1^2}} \right. \\
&\cdot \left. \operatorname{erfc} \left\{ \frac{2nh_1+z}{2\sqrt{Dx}} - \frac{1}{h_1} \sqrt{Dx} \right\} + e^{\frac{1}{h_1} \{ 2(n+1)h_1-z \} + \frac{Dx}{h_1^2}} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{2(n+1)h_1-z}{2\sqrt{Dx}} + h_1\sqrt{Dx} \right\} \right. \\
&\left. + e^{\frac{1}{h_1} \{ 2nh_1+z \} + \frac{Dx}{h_1^2}} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{2nh_1+z}{2\sqrt{Dx}} + \frac{1}{h_1} \sqrt{Dx} \right\} \right] - \frac{\theta_0}{2eh_1} \sqrt{Dx} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left[\{ h_1 e^{-\frac{1}{h_1} \{ 2(n+1)h_1+z \} + \frac{Dx}{h_1^2}} \right.
\end{aligned}$$

$$-h_1 e^{\frac{1}{h_1} \{2(n+1)h_1+z\} + \frac{Dx}{h_1^2}} \} \operatorname{erfc} \frac{2(n+1)h_1+z}{2\sqrt{Dx}} - \{ h_1 e^{-\frac{1}{h_1} (2nh_1+z) + \frac{Dx}{h_1^2}} - h_1 e^{\frac{1}{h_1} (2nh_1+z) + \frac{Dx}{h_1^2}} \} \\ \cdot \operatorname{erfc} \frac{2nh_1+z}{2\sqrt{Dx}} \}] \quad (5-20)$$

(2) 中間層 (変水層)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{第1内部境界面 (} z = h_1 \text{) において,} \\ \text{第2内部境界面 (} z = h_2 \text{) において,} \\ \text{起点 (} x = 0 \text{) において,} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0 \\ \theta = a_0 z^2 + b_0 z + c_0 \end{array}$$

同様に Laplace 交換によって,

$$\theta = a_0 z^2 + b_0 z + c_0 - 2a_0 D \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left[\left\{ x + \frac{\{n(h_2-h_1)+z-h_1\}^2}{2D} \right\} \operatorname{erfc} \frac{n(h_2-h_1)+z-h_1}{2\sqrt{Dx}} \right. \\ \left. - \{n(h_2-h_1)+z-h_1\} \cdot \left(\frac{x}{\pi D}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{\{n(h_2-h_1)+z-h_1\}^2}{4Dx}} + \left\{ x + \frac{\{n(h_2-h_1)-z+h_2\}^2}{2D} \right\} \right. \\ \left. \cdot \operatorname{erfc} \frac{n(h_2-h_1)-z+h_2}{2\sqrt{Dx}} - \{n(h_2-h_1)-z+h_2\} \cdot \left(\frac{x}{\pi D}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{\{n(h_2-h_1)-z+h_2\}^2}{4Dx}} \right] \quad (5-21)$$

(3) 最下層 (深水層)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{第2内部境界面 (} z = h_2 \text{) において,} \\ \text{底面 (} z = h \text{) において,} \\ \text{起点 (} x = 0 \text{) において,} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0 \\ -\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{Q_2}{\rho c_p E_E} = -G (= \text{const.}) \\ \theta = a_0 z^2 + b_0 z + c_0 \end{array}$$

同様に Laplace 変換によって,

$$\theta = a_0 z^2 + b_0 z + c_0 + 2a_0 D x - 2a_0 D \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left[\left\{ x + \frac{\{2n(h-h_2)+z-h_2\}^2}{2D} \right\} \right. \\ \left. \cdot \operatorname{erfc} \frac{2n(h-h_2)+z-h_2}{2\sqrt{Dx}} - \{2n(h-h_2)+z-h_2\} \left(\frac{x}{\pi D}\right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{\{2n(h-h_2)+z-h_2\}^2}{4Dx}} \right. \\ \left. + \left\{ x + \frac{\{(2n+1)(h-h_2)-z+h_2\}^2}{2D} \right\} \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)(h_2-h)-z+h_2}{2\sqrt{Dx}} \right]$$

$$- \{ (2n+1)(h-h_2) - z + h_2 \} \left(\frac{x}{\pi D} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{\{(2n+1)(h-h_2) - z + h_2\}}{4Dx}} + 2(b_0 - G_2 + 2a_0 H) \sqrt{Dx}$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \operatorname{ierfc} \frac{(2n+1)(h-h_2) + z - h_2}{2\sqrt{Dx}} - \operatorname{ierfc} \frac{2n(h-h_2) + z - h}{2\sqrt{Dx}} \right\} \quad (5-22)$$

(ii)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{第2内部境界面 (} z = h_2 \text{) において,} \\ \text{底面 (} z = h \text{) において,} \\ \text{起点 (} x = 0 \text{) において,} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0 \\ -\frac{\partial \theta}{\partial z} = \lambda_2 (\theta - \theta_e) \\ \theta = a_0 z^2 + b_0 z + c_0 \end{array}$$

同様にして

$$\begin{aligned} \theta = & a_0 z^2 + b_0 z + c_0 + 2a_0 Dx - 2\lambda_2 a_0 \left[\frac{1}{(-\lambda_2)^3} e^{\lambda_2(z-h_2)+Dx\lambda_2^2} \operatorname{erfc} \frac{2n(h-h_2) + z - h_2}{2\sqrt{Dx}} \right. \\ & - \frac{1}{(-\lambda_2)^3} \sum_{r=0}^2 [-2\lambda_2 \sqrt{Dx}]^r \operatorname{ierfc} \frac{z-h_2}{2\sqrt{Dx}} - \frac{1}{(-\lambda_2)^3} e^{\lambda_2(2h-h_2-z)+Dx\lambda_2^2} \\ & \cdot \operatorname{erfc} \left\{ \frac{2h-h_2-z}{2\sqrt{Dx}} + \lambda_2 \sqrt{Dx} \right\} + \frac{1}{(-\lambda_2)^3} \sum_{r=0}^2 [-2\lambda_2 \sqrt{Dx}]^r \operatorname{ierfc} \frac{2h-h_2-z}{2\sqrt{Dx}} \Big] \\ & - 2a_0 \left[\frac{2}{\lambda_2} \left(\frac{Dx}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{(z-h_2)^2}{4Dx}} - \frac{1+\lambda_2(z-h_2)}{\lambda_2^2} \operatorname{erfc} \frac{z-h_2}{2\sqrt{Dx}} + \frac{1}{\lambda_2^2} e^{\lambda_2(z-h_2)+Dx\lambda_2^2} \right. \\ & \cdot \operatorname{erfc} \left\{ \frac{z-h_2}{2\sqrt{Dx}} + \lambda_2 \sqrt{Dx} \right\} + \frac{2}{\lambda_2} \left(\frac{Dx}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{(2h-h_2-z)^2}{4Dx}} - \frac{1+\lambda_2(2h-h_2-z)}{\lambda_2^2} \operatorname{erfc} \frac{2h-h_2-z}{2\sqrt{Dx}} \\ & + \frac{1}{\lambda_2^2} e^{\lambda_2(2h-h_2-z)+Dx\lambda_2^2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{2h-h_2-z}{2\sqrt{Dx}} + \lambda_2 \sqrt{Dx} \right\} \Big] - \{ b_0 + 2a_0 h + \lambda_2 (b_0 h + a_0 h^2 + c_0 - \theta_e) \} \\ & \cdot \left[\frac{1}{\lambda_2} \operatorname{erfc} \frac{h-z}{2\sqrt{Dx}} - \frac{1}{\lambda_2} e^{\lambda_2(h-z)+Dx\lambda_2^2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{h-z}{2\sqrt{Dx}} + \lambda_2 \sqrt{Dx} \right\} - \frac{1}{\lambda_2} \operatorname{erfc} \frac{h+z-2h_2}{2\sqrt{Dx}} \right. \\ & - \frac{1}{\lambda_2} e^{\lambda_2(h+z-2h_2)+Dx\lambda_2^2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{h+z-2h_2}{2\sqrt{Dx}} + \lambda_2 \sqrt{Dx} \right\} \Big] - 2a_0 \left[\frac{1}{(-\lambda_2)^3} e^{\lambda_2(h-z)+Dx\lambda_2^2} \right. \\ & \cdot \operatorname{erfc} \left\{ \frac{h-z}{2\sqrt{Dx}} + \lambda_2 \sqrt{Dx} \right\} - \frac{1}{(-\lambda_2)^3} \sum_{r=0}^2 [-2\lambda_2 \sqrt{Dx}]^r \operatorname{ierfc} \frac{h-z}{2\sqrt{Dx}} - \frac{1}{(-\lambda_2)^3} \sum_{r=0}^2 e^{\lambda_2(h+z-2h_2)+Dx\lambda_2^2} \end{aligned}$$

$$\cdot \operatorname{erfc} \left\{ \frac{h+z-2h_2}{2\sqrt{Dx}} + \lambda_2 \sqrt{Dx} \right\} + \frac{1}{(-\lambda_2)^3} \sum_{i=0}^2 \left[-2\lambda_2 \sqrt{Dx} \right]^i \operatorname{erfc} \frac{h+z-2h_2}{2\sqrt{Dx}} \right] + \dots \quad (5-23)$$

(II) 成層していない状態

(i)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{水表面 (} z=0 \text{) において,} \\ \text{底面 (} z=h \text{) において,} \\ \text{起点 (} x=0 \text{) において,} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} -\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{Q_1}{\rho_{c_p} E_z} = -G_1 (= \text{const.}) \\ -\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{Q_2}{\rho_{c_p} E_z} = -G_2 (= \text{const.}) \\ \theta = a_0 z^2 + b_0 z + c_0 \end{array}$$

同様に Laplace 変換によって,

$$\begin{aligned} \theta = & a_0 z^2 + b_0 z + c_0 + 2a_0 Dx + 2(G - b_0) \sqrt{Dx} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \operatorname{ierfc} \frac{2(n+1)h-z}{2\sqrt{Dx}} - \operatorname{ierfc} \frac{2nh+z}{2\sqrt{Dx}} \right\} \\ & + 2(G_2 - b_0 - 2a_0 h) \sqrt{Dx} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \operatorname{ierfc} \frac{2(n+1)h-z}{2\sqrt{Dx}} + \operatorname{ierfc} \frac{(2n+1)h+z}{2\sqrt{Dx}} \right\} \end{aligned} \quad (5-24)$$

(ii)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{水表面 (} z=0 \text{) において,} \\ \text{底面 (} z=h \text{) において,} \\ \text{起点 (} z=0 \text{) において,} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} -\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{Q_2}{\rho_{c_p} E_z} = -G_1 (= \text{const.}) \\ -\frac{\partial \theta}{\partial z} = \lambda_2 (\theta - \theta_e) \\ \theta = a_0 z^2 + b_0 z + c_0 \end{array}$$

同様に

$$\begin{aligned} \theta = & (b_0 - G_2) \cdot \lambda_2 \cdot \left[\frac{2}{\lambda_2} \left(\frac{Dx}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{z^2}{4Dx}} - \frac{1 + \lambda_2 z}{\lambda_2^2} \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{Dx}} + \frac{1}{\lambda_2^2} e^{\lambda_2 z + Dx \lambda_2^2} \right. \\ & \cdot \operatorname{erfc} \left\{ \frac{z}{2\sqrt{Dx}} + \lambda_2 \sqrt{Dx} \right\} - \frac{2}{\lambda_2} \left(\frac{Dx}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{(2h-z)^2}{4Dx}} + \frac{1 + \lambda_2 (2h-z)}{\lambda_2^2} \operatorname{erfc} \frac{2h-z}{2\sqrt{Dx}} \\ & + \frac{1}{\lambda_2^2} e^{\lambda_2 (2h-z) + Dx \lambda_2^2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{2h-z}{2\sqrt{Dx}} + \lambda_2 \sqrt{Dx} \right\} + \frac{1}{\lambda_2} \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{Dx}} - \frac{1}{\lambda_2} e^{\lambda_2 z + Dx \lambda_2^2} \\ & \cdot \operatorname{erfc} \left\{ \frac{z}{2\sqrt{Dx}} + \lambda_2 \sqrt{Dx} \right\} + \frac{1}{h_2} \operatorname{erfc} \frac{2h-z}{2\sqrt{Dx}} - \frac{1}{\lambda_2} e^{\lambda_2 (2h-z) + Dx \lambda_2^2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{2h-z}{2\sqrt{Dx}} + \lambda_2 \sqrt{Dx} \right\} \left. \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \{ b_0 + 2a_0h + \lambda_2 (b_0 + a_0h) + \lambda_2 (c_0 - \theta_e) \} \left\{ \frac{1}{\lambda_2} \operatorname{erfc} \frac{h+z}{2\sqrt{Dx}} + \frac{1}{\lambda_2} e^{\lambda_2(h+z)+Dx\lambda_2^2} \right. \\
& \cdot \operatorname{erfc} \left\{ \frac{h+z}{2\sqrt{Dx}} + \lambda_2\sqrt{Dx} \right\} + \frac{1}{\lambda_2} \operatorname{erfc} \frac{h-z}{2\sqrt{Dx}} - \frac{1}{\lambda_2} e^{\lambda_2(h-z)+Dx\lambda_2^2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{h-z}{2\sqrt{Dx}} + \lambda_2\sqrt{Dx} \right\} \\
& + \frac{2\lambda_2 a_0}{D} \left[\frac{D}{(-\lambda_2)^3} e^{\lambda_2(h+z)+Dx\lambda_2^2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{h+z}{2\sqrt{Dx}} + \lambda_2\sqrt{Dx} \right\} - \frac{1}{(-\lambda_2)^3} \sum_{r=0}^2 [-2\lambda_2\sqrt{Dx}]^r i^r \operatorname{erfc} \frac{h+z}{2\sqrt{Dx}} \right. \\
& \left. + \frac{1}{(-\lambda_2)^3} e^{\lambda_2(h-z)+Dx\lambda_2^2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{h-z}{2\sqrt{Dx}} + \lambda_2\sqrt{Dx} \right\} - \frac{1}{(-\lambda_2)^3} \sum_{r=0}^2 [-2\lambda_2\sqrt{Dx}]^r i^r \operatorname{erfc} \frac{h-z}{2\sqrt{Dx}} \right] + \dots \dots
\end{aligned}$$

(5-25)

(iii)

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{水表面 (} z=0 \text{) において,} & -\frac{\partial \theta}{\partial z} = \lambda_1 (\theta_a - \theta) \\ \text{底面 (} z=h \text{) において,} & -\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{Q_2}{\rho c_p E_z} = -G_2 \text{ (} = \text{const.)} \\ \text{起点 (} x=0 \text{) において,} & \theta = a_0 z^2 + b_0 z + c_0 \end{array} \right.$$

同様に

$$\begin{aligned}
\theta = & a_0 z^2 + b_0 z + c_0 + 2a_0 Dx - \lambda_1 (b_0 - G_1) \left[\frac{2}{-\lambda_1} \left(\frac{Dx}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{(h-z)}{4Dx}} - \frac{1-\lambda_1(h-z)}{(-\lambda_1)^2} \operatorname{erfc} \frac{h-z}{2\sqrt{Dx}} \right. \\
& + \frac{1}{(-\lambda_1)^2} e^{-\lambda_1(h-z)+Dx(-\lambda_1)^2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{h-z}{2\sqrt{Dx}} - \lambda_1\sqrt{Dx} \right\} - \frac{1}{(-\lambda_1)} \left(\frac{Dx}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{(h+z)}{4Dx}} - \frac{1-\lambda_1(h+z)}{(-\lambda_1)^2} \\
& \cdot \operatorname{erfc} \frac{h+z}{2\sqrt{Dx}} + \frac{1}{(-\lambda_1)^2} e^{-\lambda_1(h+z)+Dx(-\lambda_1)^2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{h+z}{2\sqrt{Dx}} - \lambda_1\sqrt{Dx} \right\} - (b_0 - G_1) \left[\frac{1}{-\lambda_1} \operatorname{erfc} \frac{h-z}{2\sqrt{Dx}} \right. \\
& - \frac{1}{(-\lambda_1)} e^{-\lambda_1(h-z)+Dx(-\lambda_1)^2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{h-z}{2\sqrt{Dx}} - \lambda_1\sqrt{Dx} \right\} - \frac{1}{(-\lambda_1)} \operatorname{erfc} \frac{h+z}{2\sqrt{Dx}} + \frac{1}{(-\lambda_1)} e^{-\lambda_1(h+z)+Dx(-\lambda_1)^2} \\
& \cdot \operatorname{erfc} \left\{ \frac{h+z}{2\sqrt{Dx}} - \lambda_1\sqrt{Dx} \right\} \left. \right] + \{ b_0 - \lambda_1 (\theta_a - c_0) \} \left[\frac{1}{-\lambda_1} \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{Dx}} - \frac{1}{(-\lambda_1)} e^{-\lambda_1 z + Dx(-\lambda_1)^2} \right. \\
& \cdot \operatorname{erfc} \left\{ \frac{z}{2\sqrt{Dx}} - \lambda_1\sqrt{Dx} \right\} + \frac{1}{(-\lambda_1)} \operatorname{erfc} \frac{2h-z}{2\sqrt{Dx}} - \frac{1}{(-\lambda_1)} e^{-\lambda_1(2h-z)+Dx(-\lambda_1)^2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{2h-z}{2\sqrt{Dx}} - \lambda_1\sqrt{Dx} \right\} \left. \right] \\
& + \frac{-2\lambda_1 a_0}{D} \left[\frac{D}{(-\lambda_1)^3} e^{-\lambda_1 z + Dx(-\lambda_1)^2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{z}{2\sqrt{Dx}} - \lambda_1\sqrt{Dx} \right\} - \frac{D}{(-\lambda_1)^3} \sum_{r=0}^2 [-2(-\lambda_1)\sqrt{Dx}]^r i^r \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \cdot \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{Dx}} + \frac{D}{(-\lambda_1)^3} e^{-\lambda_1(2h-z)+Dx(-\lambda_1)^2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{2h-z}{2\sqrt{Dx}} - \lambda_1\sqrt{Dx} \right\} - \frac{D}{(-\lambda_1)^3} [-2(-\lambda_1)\sqrt{Dx}]^2 i^2 \\ & \cdot \operatorname{erfc} \frac{2h-z}{2\sqrt{Dx}} \} + \dots \dots \dots \end{aligned} \quad (5-26)$$

(iv)

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{水表面 (} z=0 \text{) において,} & -\frac{\partial \theta}{\partial z} = \lambda_1 (\theta_a - \theta) \\ \text{底面 (} z=h \text{) において,} & -\frac{\partial \theta}{\partial z} = \lambda_2 (\theta - \theta_e) \\ \text{起点 (} x=0 \text{) において,} & \theta = a_0 z^2 + b_0 z + c_0 \end{array} \right.$$

この場合、 $\frac{\partial \theta}{\partial x} = D \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}$ の解析解は、 λ_1 と λ_2 の値が同程度の大きさのときは容易に得ることはできない。ただ特別な場合として、 $\lambda_0 = 0$ のとき、底面 ($z=h$) で断熱条件となり、(iii) の場合において、 $q_2=0$ としたものになる。

以上の理論解を、(I) の場合を代表例として図5-3～図5-5に示す。これらはあくまで、条件が一定で簡略化された場合であり、これらの状態のうち適当な場合を抜き出して組み合わせることによって、大よその1年の水温変化を知ることができる。

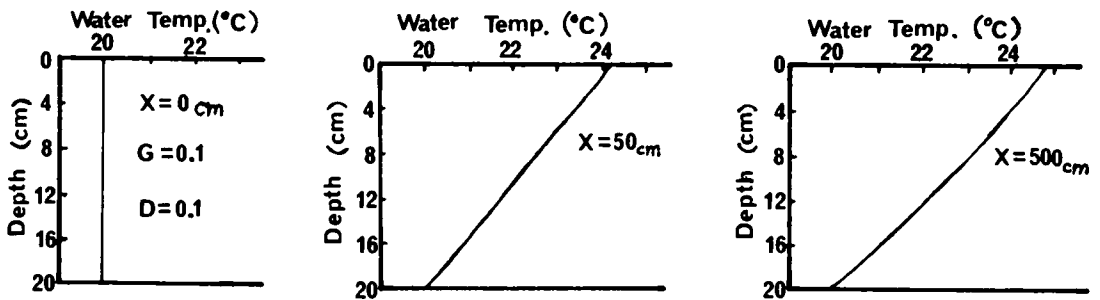


図5-3 解析解 ($b=c=0$ の場合)

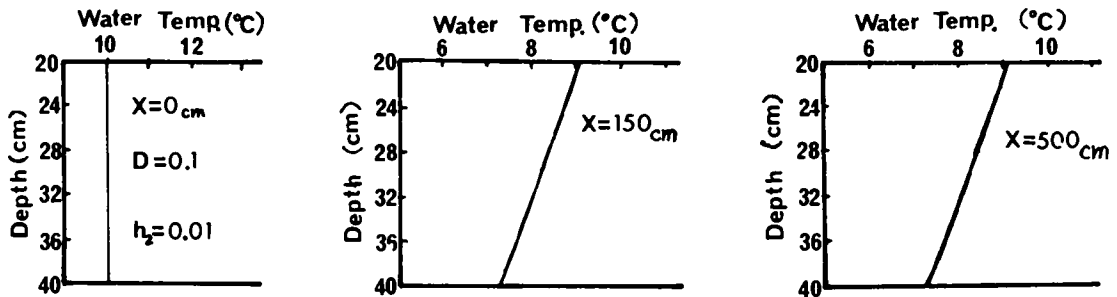


図5-4 解析解 ($b=c=0$ の場合)

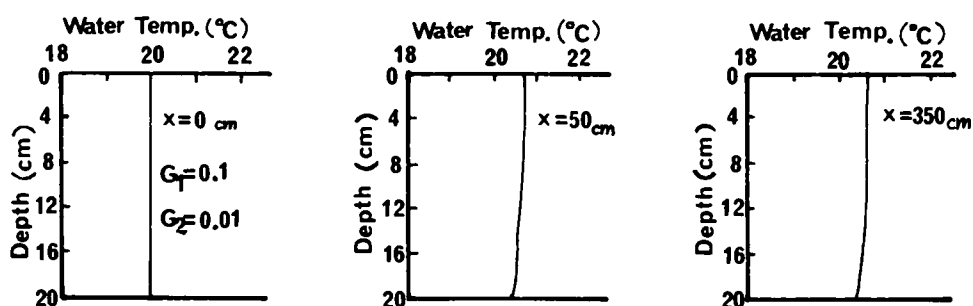


図 5-5 解析解 (b = c = 0 の場合)

(Ⅳ) 差分式による近似解

一般に、式 (5-2) で表わされる 2 次元の定常熱拡散方程式の理論解を得ることは、流速や拡散係数の変化の状態や、起点および境界条件の複雑さから考えて、困難である。それゆえ、実用的には定常状態については式 (5-2) をつぎのように差分式近似し、貯水池縦断面に格子点網を組み、電子計算機による逐次計算を行って、各点での水温を順次求めるのが便利である。

$$\begin{aligned}
 & u(i, j) \times \frac{\theta(i+1, j) - \theta(i, j)}{\Delta x} + w(i, j) \times \frac{\theta(i, j+1) - \theta(i, j)}{\Delta z} = \\
 & E_x(i, j) \times \frac{\theta(i+1, j) + \theta(i-1, j) - 2 \cdot \theta(i, j)}{(\Delta x)^2} + E_z(i, j) \\
 & \times \frac{\theta(i, j+1) + \theta(i, j-1) - 2 \cdot \theta(i, j)}{(\Delta z)^2} \quad (5-27)
 \end{aligned}$$

この計算結果の例として、第 4 章の模型実験の場合に適用したものを図 5-6～図 5-7 に示す。これは境界条件として、水表面および底面において一定の熱の流出入のある場合の例であり、変水層では、模型実験の結果より $\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0$ と見て、水温の直線分布を仮定しており、表水層と深水層について上式 (5-27) の計算結果と組み合わせたものである。図 5-6 と図 5-7 より明らかなように、変水層 (温度躍層) 上部での fit が少し悪い程度で、全体的にはかなりの適合を示している。

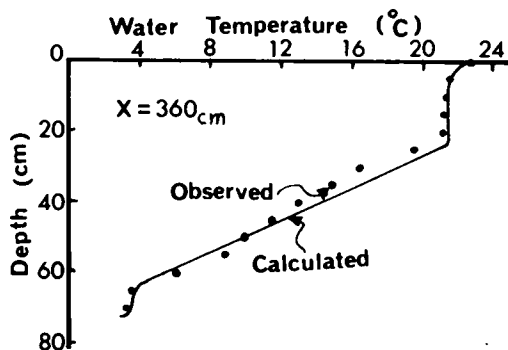


図 5-6 数値解

このように差分式近似による熱拡散方程式の数値解法は、つぎのようにもとの拡散方程式の理論解が得られない場合など、実用上便利である。すなわち、

- (1) 流速や拡散係数が一定として扱えない場合、
- (2) 貯水池の幅や水深など地形が複雑な場合、
- (3) 起点条件や境界条件が複雑な場合、

しかし、層の分割の際の基本となる温度躍層の位置や強度、流速や拡散係数の変化の状態の推定などの問題が残される。このうち、温度躍層の位置推定は、貯水池の規模と形状、熱収支、取水および放流状態、

流入水の水温および水量などから、かなり正確に推定できるし、他の同様の条件下の貯水池での資料も参考にできる。したがって、貯水池の各種の条件による分類をもとに、比較的資料の多い水温分布については、それより温度成層状態の推定が可能となる。しかし、流速や拡散係数の変化の状態は、その参考資料が第2章でも述べたように少く、限られた貯水池や湖の流動パターン例をもとに仮定せざるを得ない状態である。

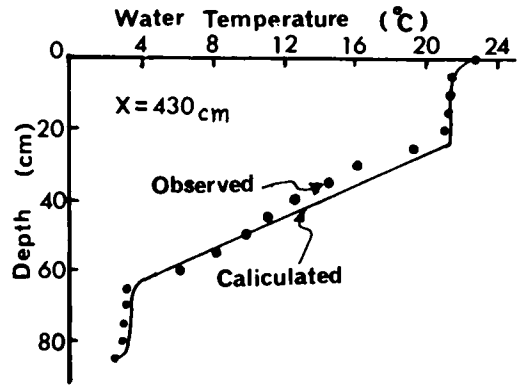


図5-7 数値解

以上のように、理論解と数値解の両者とも、その成層の有無、温度躍層の数と強度の推定をもとに、成層していない場合、二層状態、三層状態のパターン分けを組み合わせ、1年をサイクルとする水温変化の安定した状態について、解析することができる。これより、さらに水温の滑らかな周年変化の概要を把握するには、実際の観測結果に基く前述の調和分析が役立つであろう。

第3節 浮遊性物質

一般に、密度成層した流体中を沈降する浮遊物質は、その流体の密度変化とそれに伴う粘性の変化の影響を受け、一様密度の流体中とは異なった挙動をとる。このような現象は、天然湖沼でも見られ、Take-mura によって温度成層した静止水体中での実験によって確認されている¹³⁾。いま、考えようとしている場合は乱流場ではあるが、その安定した成層状態では各層間の混合度は小さく、浮遊性物質は各層間の内部境界面において、上の層から下の層へ沈降するのを一旦阻止される状態となり、一部は一時抑留されたのちこれを通過し、残りは上の層の下部付近に抑留されたまま浮遊し滞留することになる。^{13, 14)}

例えば、水温が水表面で30℃、底面で4℃であるような成層状態においては、その水体の温度による密度変化は0.99568 g/cm³から1.00000 g/cm³までの0.432%程度に過ぎないが、粘性係数は 1.5674×10^{-2} dyne·sec/cm²から 0.8007×10^{-2} dyne·sec/cm²とほぼ半減する。さらに、流動水体においては、乱れの大きさや速度分布の差違によって現象を複雑化しているが、大きな中間流が存在する場合は、上記の原因が優勢に内部境界面での物質移動を支配することになる。

一般に、浮遊性物質は、2～3μの粒径を境界として沈降性物質と非沈降性物質に分けられるが、ここでは沈降性物質を中心にして考え、非沈降性物質は粒子の沈降速度が0の特殊な場合として考えることにする。また、生物学的反応などによる減衰性を考慮すると、非定常2次元の拡散方程式は、次式(5-28)となる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + w \frac{\partial c}{\partial z} = E_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + E_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - w_0 \frac{\partial c}{\partial z} - \kappa c \quad (5-28)$$

ここで、 c : 浮遊性物質濃度

x : 流下方向距離

w_0 : 浮遊性物質の沈降速度

z : 水深方向距離

$$\left\{ \begin{array}{ll} u : x \text{ 方向の速度} & E_x : x \text{ 方向の拡散係数} \\ w : y \text{ 方向の速度} & E_z : z \text{ 方向の拡散係数} \\ \kappa : \text{反応速度係数} & t : \text{時間} \end{array} \right.$$

境界条件は、水表面 ($z=0$) と底面 ($z=h_3$) の他に、内部の層境界面において考え、底面のみならず内部の層境界面においても浮遊性物質再浮上に関する境界条件¹⁵⁾を拡大して適用を試みることにする。すなわち、再浮上の現象を記述するパラメーター k を、内部の層境界面における物質移動に関するパラメーター k と、定義しなおして用いることにする。この k は、層の鉛直安定度や Ri 数などに関係する物理的諸因子および移動する物質固有の性質にも支配されるものと考えられることができる。そして、 k の範囲は、一般に、 $0 \leq k \leq 1$ であるが、ここで考えている k の範囲は $k \leq 1$ で負の値もとることがありうる。すなわち、図 5-1 の解析モデルにおける三層状態においては、 $w_p = w + w_0$ として、

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{水表面 (} z=0 \text{) において,} & E_z \frac{\partial c}{\partial z} - w_p c = 0 \\ \text{第 1 内部境界面 (} z=h_1 \text{) において,} & E_z \frac{\partial c}{\partial z} - k_1 w_p c = 0 \\ \text{第 2 内部境界面 (} z=h_2 \text{) において,} & E_z \frac{\partial c}{\partial z} - k_2 w_p c = 0 \\ \text{底面 (} z=h_3 \text{) において,} & E_z \frac{\partial c}{\partial z} - k_3 w_p c = 0 \end{array} \right. \quad (5-29)$$

ところで、貯水池の幅方向の水質変化が無視できる場合に、流下方向、水深方向、および時間による 2 次元非定常の基本式 (5-28) によって、貯水池の水質変化を表わし得たとしても、各項の係数は時間および場所の関数であって、一般に理論的な解を得ることができない。したがって、理論解を得ようとすれば、以下のように次元を 1 つ減らして、かつ係数が定数の場合に限定されることになる。それも境界条件の複雑さの程度によってさらに制限を受けることになる。

(1) 定常 2 次元としての解析

浮遊性物質の変化において、流下方向への流動が定常的であるならば、その時間的な変化はある程度まで流下距離の変化として把握することができる。したがって、水平方向、すなわち、流下方向、および水深方向の 2 次元、かつ定常の場合を考え、1 次の反応項を考慮した基本式 (5-28) において、 t に関する項を落とし、流下方向の拡散項を無視したつぎの式 (5-30) を用いることになる。すなわち、

$$u \frac{\partial c}{\partial x} + w \frac{\partial c}{\partial z} = E_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - w_0 \frac{\partial c}{\partial z} - \kappa c \quad (5-30)$$

$w + w_0 = w_p$ とおくと、式 (5-30) は次式となる。

$$u \frac{\partial c}{\partial x} + w_p \frac{\partial c}{\partial z} = E_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \kappa c \quad (5-31)$$

ここで、 u 、 w_p 、 E_z および κ は、場所の関数であり、 x および z によって変化するので (5-30) 式の解は差分式近似による数値解などによることになる。しかし、 u 、 w_p 、 E_z および κ が定数である特殊な

場合については以下のように解析解を得ることができる。したがって、浮遊性物質の貯水池全体での変化の程度を推定するにはこの解析解が役立つものと考えられる。また、反応による変化のない場合は $\kappa = 0$ とおけばよい。

境界条件および起点条件は、前述の条件式(5-29)を適用する。すなわち、

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{水表面} & (z=0) \text{において,} & E_z \frac{\partial c}{\partial z} - w_p c = 0 \\ \text{第1内部境界面} & (z=h_1) \text{において,} & E_z \frac{\partial c}{\partial z} - k_1 w_p c = 0 \\ \text{第2内部境界面} & (z=h_2) \text{において,} & E_z \frac{\partial c}{\partial z} - k_2 w_p c = 0 \\ \text{底面} & (z=h_3) \text{において,} & E_z \frac{\partial c}{\partial z} - k_3 w_p c = 0 \end{array} \right.$$

$$\text{起点条件} \quad (x=0) \text{において,} \quad c = c_0(z)$$

(i) 最上層(表水層)

まず、 $c = \phi \cdot \exp \left\{ -\frac{w_p^2 x}{4uE_z} + \frac{w_p z}{2E_z} \right\}$ と変数変換を行うと、拡散方程式(5-31)および条件式(5-

29) はつぎのようになる。

$$u \frac{\partial \phi}{\partial x} = E_z \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \kappa \phi \quad (5-32)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} z=0 \text{において,} & \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{w_p}{2E_z} \phi \\ z=h_1 \text{において,} & \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{w_p}{2E_z} (2k_1 - 1) \phi \\ x=0 \text{において,} & \phi = c_0(z) \cdot \exp \left\{ -\frac{w_p z}{2E_z} \right\} \end{array} \right.$$

さらに、 $\phi = \phi \cdot \exp \left\{ -\frac{\kappa}{u} x \right\}$ なる変数変換によって、拡散方程式(5-32)と条件式は以下のようになる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{E_z}{u} \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \quad (5-33)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} z=0 \text{において,} & \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{w_p}{2E_z} \phi (=K_1 \phi) \\ z=h_1 \text{において,} & \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{w_p}{2E_z} (2k_1 - 1) \phi (=K_2 \phi) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x=0 \text{ において,} \\ \phi = c_0(z) \cdot \exp\left\{-\frac{w_p z}{2E_z}\right\} \end{array} \right.$$

ここで, $\frac{w_p}{2E_z} = K_1$, $\frac{w_p}{2E_z} (1 - 2k_1) = K_2$ とおくと, 拡散方程式 (5-34) の特解として,

$$\phi = \exp\left\{-\frac{E_z}{u} \lambda_n^2 x\right\} \cdot (A \cos \lambda_n z + B \sin \lambda_n z) \quad (5-35)$$

境界条件から,

$$B = \frac{K_1}{\lambda} A \quad (5-36) \quad \text{および} \quad \tan \lambda h_1 = \frac{\lambda(K_1 + K_2)}{\lambda^2 - K_1 K_2} \quad (5-37)$$

上式 (5-37) を満足する λ の正根は無限にあり, それを λ_n ($n = 1, 2, \dots$) で表わし,

$$\cos \lambda_n + \frac{K_1}{\lambda_n} \sin \lambda_n z = X_n \quad (5-38)$$

とおくと, 拡散方程式 (5-34) および境界条件 (5-29) を満足する解の組み合わせとして, つぎの式 (5-39) が得られる。

$$\phi = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot e^{-\frac{E_z}{u} \lambda_n^2 x} \cdot X_n \quad (5-39)$$

ここで, X_n は $0 < z < h_1$ の範囲で, つぎの関係式 (5-40) および (5-41) が成立し, 直交関数系であるから, X_n の展開によって A_n は次式 (5-42) によって表わすことができる。¹⁵⁾

$$\int_0^{h_1} X_m \cdot X_n dz = 0 \quad (5-40)$$

$$\int_0^{h_1} X_n^2 dz = \frac{1}{2\lambda_n^2 (\lambda_n^2 + K_2^2)} \cdot \{(\lambda_n^2 + K_1^2)(\lambda_n^2 + K_2^2)h_1 + (K_2 - K_1)(\lambda_n^2 - K_1 K_2)\} \quad (5-41)$$

$$A_n = \frac{2\lambda_n^2 (\lambda_n^2 + K_2^2)}{(\lambda_n^2 + K_1^2)(\lambda_n^2 + K_2^2)h_1 + (K_2 - K_1)(\lambda_n^2 - K_1 K_2)} \int_0^{h_1} \phi_0(z) \cdot X_n dz \quad (5-42)$$

したがって, 拡散方程式 (5-34) の解は, 以下ようになる。

$$\begin{aligned} \phi = 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{E_z}{u} \lambda_n^2 x} & \frac{(\lambda_n^2 + K_2^2)(\lambda_n \cos \lambda_n z - K_1 \sin \lambda_n z)}{(\lambda_n^2 + K_1^2)(\lambda_n^2 + K_2^2)h_1 + (K_2 - K_1)(\lambda_n^2 - K_1 K_2)} \int_0^{h_1} \phi_0(\xi) \\ & \cdot (\lambda_n \cos \lambda_n \xi - K_1 \sin \lambda_n \xi) d\xi \end{aligned} \quad (5-43)$$

そして, ϕ から c へ, ϕ から c へと変数を逆変換して, 次式 (5-44) を得る。

$$\begin{aligned} c = 2e^{-\left\{\frac{\kappa}{u}x + \frac{w_p^2 x}{4uE_z} - \frac{w_p z}{2E_z}\right\}} & \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{E_z}{u} \lambda_n^2 x} \frac{(\lambda_n^2 + K_2^2)(\lambda_n \cos \lambda_n z - K_1 \sin \lambda_n z)}{(\lambda_n^2 + K_1^2)(\lambda_n^2 + K_2^2)h_1 + (K_2 - K_1)(\lambda_n^2 - K_1 K_2)} \\ & \cdot \int_0^{h_1} \phi_0(\xi) (\lambda_n \cos \lambda_n \xi - K_1 \sin \lambda_n \xi) d\xi \end{aligned} \quad (5-44)$$

(2) 中間層 (変水層)

この場合は, 三層状態の第2層がこれにあたり, 4層以上ある場合には最上層と最下層を除いた層にも適用され, 二層以下の状態ではこれは存在しない。実際の現象では, 温度成層流の変水層 (躍層) がこれに相当し, その水質変化の基本式は (i) の場合と同じ式 (5-31) である。また, その境界条件と起點条件はつぎのようになる。ただし, この層においても $u = \text{const.}$ と取り扱える特別な場合に限られる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{第1内部境界面 (} z = h_1 \text{) において,} \\ \text{第2内部境界面 (} z = h_2 \text{) において,} \\ \text{起点 (} x = 0 \text{) において,} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} E_z \frac{\partial c}{\partial z} - k_1 w_p c = 0 \\ E_z \frac{\partial c}{\partial z} - k_2 w_p c = 0 \\ c = c_0(z) \end{array}$$

解析上、その取り扱いを容易にするために z 軸を水深方向に h_1 だけ平行移動すると、境界条件と起点条件は以下ようになる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{第1内部境界面 (} z = 0 \text{) において,} \\ \text{第2内部境界面 (} z = h_m \text{) において,} \\ \text{起点 (} x = 0 \text{) において,} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{w_p}{E_z} (2k_1 - 1) c = -K_2 c \\ \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{w_p}{E_z} (2k_2 - 1) c = -K_3 c \\ c = c'_0(z) \end{array}$$

ここで、 $h_m = h_2 - h_1$ である。

これ以降の解析は (i) と同様に進めて得られ、結果は次式となる。

$$c = 2e^{-\left(\frac{\kappa}{u} + \frac{w_p^2 x}{4uE_z} - \frac{w_p z}{2E_z}\right)} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{E_z \lambda_n^2 x}{u}} \frac{(\lambda_n^2 + K_3^2)(\lambda_n \cos \lambda_n z - K_2 \sin \lambda_n z)}{(\lambda_n^2 + K_2^2)(\lambda_n^2 + K_3^2) + (K_3 - K_2)(\lambda_n^2 - K_2 K_3)} \int_0^{h_m} c'_0(\xi) \cdot e^{-\frac{w_p \xi}{2E_z} (\lambda_n \cos \xi - K_2 \sin \lambda_n \xi)} d\xi \quad (5-45)$$

(3) 最 下 層 (深水層)

この場合は、三層状態の第3層、二層状態の第2層といずれも最下層がこれに当たり、実際の現象では深水層に相当する。その水質変化の基本式は前述の式 (5-31) であり、境界条件と起点条件は (ii) と同様である。この場合も (ii) と同様に解析的な取り扱いを容易にするために z 軸を水深方向に h_2 だけ平行移動し、 $h_1 = h_3 - h_2$ とする。その条件と解は以下のとおりである。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{第2内部境界面 (} z = 0 \text{) において,} \\ \text{底 面 (} z = h_1 \text{) において,} \\ \text{起 点 (} x = 0 \text{) において,} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{w_p}{E_z} (2k_2 - 1) c = -K_3 c \\ \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{w_p}{E_z} (2k_3 - 1) c = -K_4 c \\ c = c'_0(z) \end{array}$$

$$c = 2e^{-\left(\frac{\kappa}{u} + \frac{w_p^2 x}{4uE_z} - \frac{w_p z}{2E_z}\right)} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{E_z \lambda_n^2 x}{u}} \frac{(\lambda_n^2 + K_4^2)(\lambda_n \cos \lambda_n z - K_3 \sin \lambda_n z)}{(\lambda_n^2 + K_3^2)(\lambda_n^2 + K_4^2) + (K_4 - K_3)(\lambda_n^2 - K_3 K_4)} \int_0^{h_1} c'_0(\xi) \cdot e^{-\frac{w_p \xi}{2E_z} (\lambda_n \cos \lambda_n \xi - K_3 \sin \lambda_n \xi)} d\xi \quad (5-46)$$

(4) 成層していない場合

この場合は、水表面から底面まで流体の密度がほぼ一様で、通常の水路や河川の流動状態などがこれにあたり、成層状態に比べてその流れの乱れや上下の混合度は大きい。そして、その解析的な取り扱いも一般の水質汚濁の解析の場合と同様になるが、洪水による直接的な影響の小さな部分では、底面での浮遊性物質の再浮上に関する問題となる。その水質変化の基本式は前出の式 (5-31) で、その境界および起点条件はつぎのようになる。

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{水表面 (} z=0 \text{) において,} & E_z \frac{\partial c}{\partial z} - w_p c = 0 \\ \text{底面 (} z=h_3 \text{) において,} & E_z \frac{\partial c}{\partial z} - k_3 w_p c = 0 \\ \text{起点 (} x=0 \text{) において,} & c = c_0(z) \end{array} \right.$$

この解は、(i) の最上層の場合と同じ形になって、(i) の結果を $k_1 \rightarrow k_3$, $h_1 \rightarrow h_3$ とすればよい。

(II) 非定常 1 次元としての解析

浮遊性物質において、その水平方向の流動による変化よりも、時間的および水深方向の変化が重要視される場合には、非定常 2 次元で、一次反応項を考慮した基本式 (5-28) の x に関する項を無視して、つぎの式 (5-47) を用いることになる。すなわち、

$$\frac{\partial c}{\partial t} + w \frac{\partial c}{\partial z} = E_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - w_0 \frac{\partial c}{\partial z} - \kappa c \quad (5-47)$$

$w + w_0 = w_p$ とおくと、式 (5-48) は次式となる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + w_p \frac{\partial c}{\partial z} = E_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \kappa c \quad (5-48)$$

ここで、 c として植物プランクトン数やクロロフィル a 量がとられる場合、 κ は光合成や呼吸作用などによって時間的に変化（周日変化および周年変化）する係数となる。したがって、式 (5-48) は理論的には解けないため、差分式近似による数値解などによって解を求めることになる。この場合については、第 5 章第 5 節においてその適用例を述べることにして、 κ が定数で、かつ、実際の沈降速度 w_p および拡散係数 E_z も一定の特殊な場合について解析解を求めることにする。このように式 (5-48) の係数が全て定数である場合でも、粗い精度ながら水質汚濁の予知式として全体的な予測に用いることができると考える。そして、反応による変化のない場合は、求められた理論解で $\kappa = 0$ とすればよい。

また、境界条件および初期条件は (I) と同様の場合を考えて式 (5-49) を用いることにする。すなわち、

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{水表面} & (z=0) \text{ において,} & E_z \frac{\partial c}{\partial z} - w_p c = 0 \\ \text{第 1 内部境界面} & (z=h_1) \text{ において,} & E_z \frac{\partial c}{\partial z} - k_1 w_p c = 0 \\ \text{第 2 内部境界面} & (z=h_2) \text{ において,} & E_z \frac{\partial c}{\partial z} - k_2 w_p c = 0 \\ \text{底面} & (z=h_3) \text{ において,} & E_z \frac{\partial c}{\partial z} - k_3 w_p c = 0 \\ \text{起点条件} & (x=0) \text{ において,} & c = c_0(z) \end{array} \right. \quad (5-49)$$

(i) 第 1 層（最上層）

まず、 $c = \phi \cdot \exp \left\{ -\frac{w_p^2 t}{4uE_z} + \frac{w_p z}{2E_z} \right\}$ とおき、I と同様にして拡散方程式 (5-48) と条件式 (5-

49) はつぎのようになる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = E_z \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \kappa \phi \quad (5-50)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} z=0 \text{ において,} \\ z=h_1 \text{ において,} \\ t=0 \text{ において,} \end{array} \quad \begin{array}{l} \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{w_p}{2E_z} \phi \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{w_p}{2E_z} (2k_1 - 1) \phi \\ \phi = c_0(z) \cdot \exp \left\{ -\frac{w_p z}{2E_z} \right\} \end{array} \right.$$

さらに、 $\phi = \phi \cdot \exp \{-\kappa t\}$ とおくと、拡散方程式 (5-50) と条件式 (5-49) は、以下のようになる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = E_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (5-51)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} z=0 \text{ において,} \\ z=h_1 \text{ において,} \\ t=0 \text{ において,} \end{array} \quad \begin{array}{l} \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{w_p}{2E_z} \phi (=K_1 \phi) \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{w_p}{2E_z} (2k_1 - 1) \phi (= -K_2 \phi) \\ \phi = c_0(z) \cdot \exp \left\{ -\frac{w_p z}{2E_z} \right\} \end{array} \right.$$

したがって、(I) と同様にして拡散方程式 (5-51) の解は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \phi = 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-E_z \lambda_n^2 t} \cdot \frac{(\lambda_n^2 + K_2^2)(\lambda_n \cos \lambda_n z - K_1 \sin \lambda_n z)}{(\lambda_n^2 + K_1^2)(\lambda_n^2 + K_2^2)h_1 + (K_2 - K_1)(\lambda_n^2 - K_1 K_2)} \int_0^{h_1} \phi_0(\xi) \\ \cdot (\lambda_n \cos \lambda_n \xi - K_1 \sin \lambda_n \xi) d\xi \end{aligned} \quad (5-52)$$

そして、 ϕ から ψ へ、 ψ から c へと変数を逆変換して次式 (5-53) を得る。

$$\begin{aligned} c = 2e^{\left\{ \kappa t \cdot \frac{w_p^2}{4E_z^2} t - \frac{w_p z}{2E_z} \right\}} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-E_z \lambda_n^2 t} \cdot \frac{(\lambda_n^2 + K_2^2)(\lambda_n \cos \lambda_n z - K_1 \sin \lambda_n z)}{(\lambda_n^2 + K_1^2)(\lambda_n^2 + K_2^2)h_1 + (K_2 - K_1)(\lambda_n^2 - K_1 K_2)} \int_0^{h_1} \phi_0(\xi) \\ \cdot (\lambda_n \cos \lambda_n \xi - K_1 \sin \lambda_n \xi) d\xi \end{aligned} \quad (5-53)$$

(II) 中間層 (変水層) および最下層 (深水層)

(I) の場合と同様にすれば (i) のように解が得られる。

浮遊性物質の変化を表わす非定常 2 次元の偏微分方程式 (5-28) の理論解を得ることは、水温変化の解析の場合と同様に困難である。また、簡単化されて得られた理論解の実際現象への適用は、その貯水池の幾何形状の扱い方や、各種の係数のラフな仮定などを含んでおり、直接利用できない場合もある。そのような欠点を補うために、基本式 (5-28) および境界条件を差分近似して数値解を得ることができ、その差分式は次式 (5-54) となり、収束および安定条件を満たすように計算を進めればよい。

$$\frac{c(l+1, m, n) - c(l, m, n)}{\Delta t} + u(l, m, n) \times \frac{c(l, m+1, n) - c(l, m, n)}{\Delta x}$$

$$\begin{aligned}
& +w_p(l, m, n) \times \frac{c(l, m, n+1) - c(l, m, n)}{\Delta z} = \\
& E_x(l, m, n) \times \frac{c(l, m+1, n) + c(l, m-1, n) - 2 \cdot c(l, m, n)}{(\Delta x)^2} + E_z(l, m, n) \\
& \times \frac{c(l, m, n+1) + c(l, m, n-1) - 2 \cdot c(l, m, n)}{(\Delta z)^2} + \kappa(l, m, n) \times c(l, m, n)
\end{aligned}
\tag{5-54}$$

上式(5-54)は、時間、縦断(あるいは流下)方向、および水深方向の3次元であるが、定常状態を考慮するならば、縦断方向および水深方向に横断方向を加えて、同様の差分式により数値解を求めることができる。

ここでは、その計算結果の例として、 $\kappa=0$ 、すなわち、減衰反応のない浮遊性物質が一時的に供給される場合を示す。図5-8は流入端から一様でかつ高濃度の濁質が瞬間的に流入した場合の濃度分布の変化であり、これより時間経過および流下距離に従って、徐々にフラットな分布形状に減少することがわかる。また、 k_1 の値によって分布形状の尖りが異なってくる。

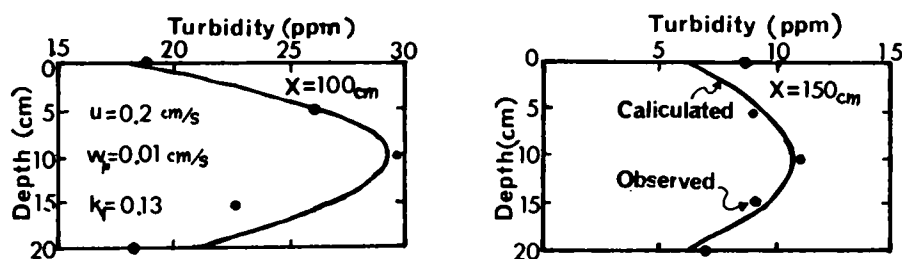


図5-8 数値解

また、つぎの第4節の溶解性物質の変化の数値計算についても同様であり、 $w_p \rightarrow w$ とし、境界条件や反応項を場合に応じて修正すればよい。

第4節 溶解性物質

溶解性物質は密度成層流体中においては、一様密度の流体中とは異なった挙動をとる¹⁸⁾とくに、安定した成層状態下における各層間の物質移動量あるいは交換量は小さく、その内部の層境界面の上下における濃度分布の一様化は阻止された状態にある。また、浮遊性物質のようにそれ自体の沈降速度を有することもないため、反応による変化などの特殊性を除けば、それが含まれる周囲の水塊と挙動をともにし、成層した上下層間の物質移動は、濃度 flux によるものや、水塊の連行現象によるものなどが考えられる。

その溶解性物質は、水表面での境界条件、および飽和度などの特殊性から、酸素や炭酸ガスの溶存気体とイオン性物質を中心とする溶解性物質とに分けて取り扱うことができる。

まず、両者に共通である内部の層境界面における物質移動および境界条件について考察する。層境界面における鉛直方向の安定性を表すパラメーターには Ri 数と鉛直安定度 E があるが、人工貯水池が河川のように流動が顕著で一過性が強い場合は、流速の鉛直方向変化が2乗の形で入る Ri 数がその特性をよく

表わす。また、湖沼のように風による流動が主で、流動性が乏しく停滞性が強い場合は、流速の項の入らない鉛直安定度 E がその状態における水質分布との関係をよく示す。貯水池における物質移動を支配する因子として、水温および流速の両者の分布とその相互関係が重要である。貯水池全体の水質変化を取り扱うという観点に立つと、 Ri 数のように流速の鉛直方向変化が 2 乗で効いていると、水温分布、より正確には密度分布の鉛直方向変化が減殺されて効いていないことが多い。しかし、鉛直安定度 E だけでは流速分布の影響をあらわしえない。したがって、第 4 章の模型実験における溶解性物質の挙動についての実験結果から、その濃度分布、水温分布、流速分布の相互関係と、鉛直安定度 E 、 Ri 数の指標に加えて、新しく密度勾配と速度勾配の積 $DV (= \frac{\partial \rho}{\partial z} \times \frac{\partial u}{\partial z})$ を導入し、それらの分布の関係の例を図 5-9、図 5-10 に示した¹⁹⁾。これより、流速と密度の変化が対等に表現され、貯水池内での鉛直方向の物質移動量の大きさとも密接に関係することがわかる。そして、安定した成層状態下では内部層境界面の密度分布および流速分布とも安定しており、その境界面での $DV (= \frac{\partial \rho}{\partial z} \times \frac{\partial u}{\partial z})$ もほぼ一定の大きさに保たれていると考えることができる。したがって、安定した成層状態下の内部の層境界面を通しての物質移動量はこの DV のように一定の濃度 flux によって支配されると考えても差しつかえはない。それゆえ、内部の層境界面での境界条件を $E_z \frac{\partial c}{\partial z} = \text{const.}$ として考えることにする。

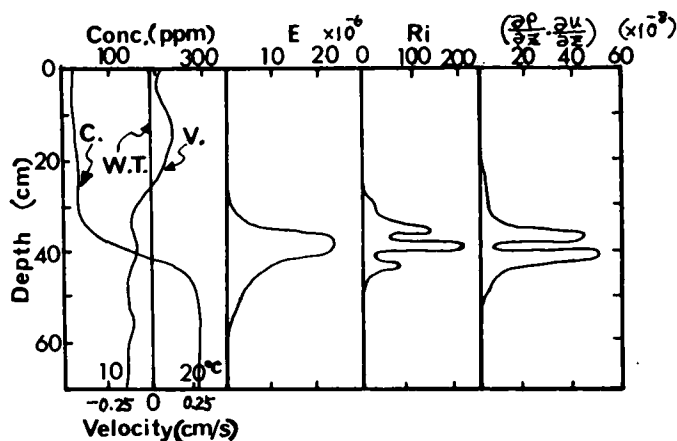


図 5-9 各指標の鉛直分布

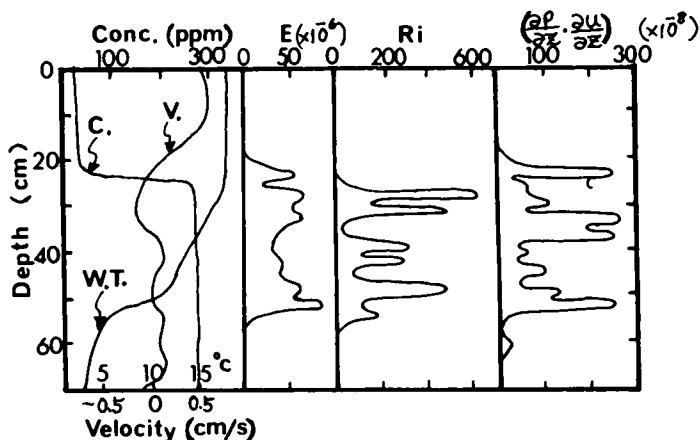


図 5-10 各指標の鉛直分布

また、水表面での境界条件としては、そこで濃度 flux が 0 であることから、 $E_z \frac{\partial c}{\partial z} = 0$ である。そして池底面では、底質と水体の物質交換として重要なものであり、底質表面の濃度 C_b とそれと接触する水体側の濃度 c の差によって物質移動量が支配されると考える。したがって、池底面での境界条件としては、 $E_z \frac{\partial c}{\partial z} = \alpha (c_b - c)$ となる。

4-1 溶解性物質

溶解性物質の変化に関する基本式は、水温や浮遊性物質と同様に図 5-1 の解析モデルに従って非定常 2 次元の次式として表わされる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + w \frac{\partial c}{\partial z} = E_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + E_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \kappa c \quad (5-55)$$

ここで、 κ は反応による減衰係数である。

また、境界条件は以下のとおりである。

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{水表面 (} z = 0 \text{) において,} & E_z \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \\ \text{第 1 内部境界面 (} z = h_1 \text{) において,} & E_z \frac{\partial c}{\partial z} = F_1 (= \text{const.}) \\ \text{第 2 内部境界面 (} z = h_2 \text{) において,} & E_z \frac{\partial c}{\partial z} = F_2 (= \text{const.}) \\ \text{池底面 (} z = h \text{) において,} & E_z \frac{\partial c}{\partial z} = \nu (c_b - c) \end{array} \right. \quad (5-56)$$

基本式 (5-55) そのままの形では理論解を得ることは不可能ゆえ、その差分式表示による数値解を電子計算機で求めることにする。

また、基本式 (5-55) をさらに簡単化した場合の理論解を求めてみる。次元および項を減らした場合の理論解になるが、ある一定の状態下での水質変化を知ることは可能である。まず、ある地点における鉛直分布の時間変化に注目する場合は、流下方向、すなわち、 x 方向の変化を無視して、

$$\frac{\partial c}{\partial t} + w \frac{\partial c}{\partial z} = E_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \kappa c \quad (5-57)$$

さらに、鉛直方向の流速 w が小さくて無視できる場合は次式となる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = E_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \kappa c \quad (5-58)$$

(1) 最下層 (深水層)

この場合は、浮遊性物質の場合と同様に、底面を含む最下層がこれにあたり、実際の現象では温度成層流の深水層に相当する。その水質変化の基本式および境界条件と起点条件は以下のようになる。

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = E_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \kappa c$$

(i)

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{第2内部境界面 (} z = h_2 \text{) において,} & E_z \frac{\partial c}{\partial z} = F_2 \\ \text{底面 (} z = h \text{) において,} & E_z \frac{\partial c}{\partial z} = F_3 \\ \text{起点 (} x = 0 \text{) において,} & c = c_0(z) \end{array} \right.$$

$c = \phi \cdot e^{-\alpha x}$ とおくと, 式(5-58)は次式となり, 境界および起点条件はさらに $\alpha = \frac{\kappa}{u}$, $\mu = \frac{E_z}{u}$ とおいて, z 軸を水深方向に h_2 だけ平行移動し, $h_1 = h - h_2$ とすると,

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \quad (5-59) \quad \left\{ \begin{array}{ll} z = 0 \text{ において,} & \frac{\partial \phi}{\partial z} = F_2 e^{-\alpha x} \\ z = h_1 \text{ において,} & \frac{\partial \phi}{\partial z} = F_3 e^{-\alpha x} \\ x = 0 \text{ において,} & \phi = c_0(z) \end{array} \right.$$

水温変化の場合と同様に, 流下方向距離 x を時間 t のように考えて, Laplace 変換 $\int_0^\infty \phi(x, z) e^{-sx} \cdot dx = \mathbf{c}(s, z)$ を行くと,

$$\frac{d^2 \mathbf{c}(s, z)}{dz^2} - \frac{1}{\mu} s \mathbf{c}(s, z) = -\frac{1}{\mu} c_0(z) \quad (5-60)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} z = 0 \text{ において,} & \frac{d \mathbf{c}(s, z)}{dz} = \frac{F_2}{s - \alpha} \\ z = h_1 \text{ において,} & \frac{d \mathbf{c}(s, z)}{dz} = \frac{F_3}{s - \alpha} \end{array} \right.$$

ここで, 起点条件を $c_0(z) = a_0 z^2 + b_0 z + c_0$ とすると,

$$\mathbf{c}(s, z) = A \cdot e^{\sqrt{\frac{s}{\mu}} z} + B \cdot e^{-\sqrt{\frac{s}{\mu}} z} + \frac{1}{s} (a_0 z^2 + b_0 z + c_0) + \frac{2 a_0 \mu}{s^2} \quad (5-61)$$

したがって, 境界条件より係数 A , B を定めて, 逆変換して変数をもとに戻すと⁸⁾,

$$\begin{aligned} c = e^{-\alpha x} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{F_3}{2} \cdot e^{-\alpha x} \cdot \left(\frac{\mu}{\alpha} \right) \cdot \left\{ e^{\{(2n+1)h_1 - z\} \sqrt{\frac{\alpha}{\mu}}} \operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+1)h_1 - z}{2\sqrt{\mu x}} - \sqrt{\alpha x} \right] \right. \right. \\ \left. \left. - e^{\{(2n+1)h_1 - z\} \sqrt{\frac{\alpha}{\mu}}} \operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+1)h_1 - z}{2\sqrt{\mu x}} + \sqrt{\alpha x} \right] + e^{-\{(2n+1)h_1 + z\} \sqrt{\frac{\alpha}{\mu}}} \right. \right. \\ \left. \left. \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+1)h_1 + z}{2\sqrt{\mu x}} - \sqrt{\alpha x} \right] - e^{\{(2n+1)h_1 + z\} \sqrt{\frac{\alpha}{\mu}}} \operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+1)h_1 + z}{2\sqrt{\mu x}} + \sqrt{\alpha x} \right] \right\} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{F_2}{2} \cdot e^{-\alpha x} \cdot \left(\frac{\mu}{\alpha}\right) \cdot \left\{ e^{(2nh_1-z)\sqrt{\frac{\alpha}{\mu}}} \operatorname{erfc}\left[\frac{2nh_1-z}{2\sqrt{\mu x}} - \sqrt{\alpha x}\right] - e^{(2nh_1-z)\sqrt{\frac{\alpha}{\mu}}} \right. \\
& \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{2nh_1-z}{2\sqrt{\mu x}} + \sqrt{\alpha x}\right] + e^{(2nh_1+z)\sqrt{\frac{\alpha}{\mu}}} \operatorname{erfc}\left[\frac{2nh_1-z}{2\sqrt{\mu x}} - \sqrt{\alpha x}\right] + e^{(2nh_1+z)\sqrt{\frac{\alpha}{\mu}}} \\
& \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{2nh_1+z}{2\sqrt{\mu x}} + \sqrt{\alpha x}\right] \left. \right\} - (2a_0h_1 + b_0) \cdot \left\{ 2\left(\frac{\mu x}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{\{(2n+1)h_1-z\}^2}{4\mu x}} - \{(2n+1)h_1-z\} \right. \\
& \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{(2n+1)h_1-z}{2\sqrt{\mu x}}\right] + 2\left(\frac{\mu x}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{\{(2n-1)h_1-z\}^2}{4\mu x}} - \{(2n-1)h_1-z\} \operatorname{erfc}\left[\frac{(2n-1)h_1-z}{2\sqrt{\mu x}}\right] \\
& + b_0 \left\{ 2 \cdot \left(\frac{\mu x}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{(2nh_1-z)^2}{4\mu x}} - (2nh_1-z) \operatorname{erfc}\left[\frac{2nh_1-z}{2\sqrt{\mu x}}\right] + 2\left(\frac{\mu x}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{(2nh_1+z)^2}{4\mu x}} \right. \\
& \left. \left. - (2nh_1+z) \operatorname{erfc}\left[\frac{2nh_1+z}{2\sqrt{\mu x}}\right] \right\} + (a_0z^2 + b_0z + c_0) + 2\mu a_0x \right. \quad (5-62)
\end{aligned}$$

(ii)

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{第2内部境界面 (} z = h_2 \text{) において,} & \frac{\partial c}{\partial z} = F_2 \\ \text{底面 (} z = h \text{) において,} & \frac{\partial c}{\partial z} = \nu (c_b - c) \\ \text{起点 (} x = 0 \text{) において,} & c = a_0z^2 + b_0z + c_0 \end{array} \right.$$

同様にして,

$$\begin{aligned}
c = & e^{-\alpha x} \cdot \left\{ (c_b - a_0h_1^2 - b_0h_1 - c_0 - \frac{2a_0h_1 + b_0}{\nu}) \cdot \left\{ \operatorname{erfc}\frac{h_1-z}{2\sqrt{\mu x}} - e^{\nu(h_1-z)+\mu x\nu^2} \right. \right. \\
& \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{h_1-z}{2\sqrt{\mu x}} + \nu\sqrt{\mu x}\right] + \operatorname{erfc}\frac{h_1+z}{2\sqrt{\mu x}} - e^{\nu(h_1+z)+\mu x\nu^2} \operatorname{erfc}\left[\frac{h_1+z}{2\sqrt{\mu x}} + \nu\sqrt{\mu x}\right] \left. \right\} \\
& - \frac{2\nu a_0}{\mu} \left\{ \frac{\mu}{(-\nu)^3} e^{\nu(h_1-z)+\mu x\nu^2} \operatorname{erfc}\left[\frac{h_1-z}{2\sqrt{\mu x}} + \nu\sqrt{\mu x}\right] - \frac{\mu}{(-\nu)^3} \sum_{r=0}^2 [-2\nu\sqrt{\mu x}]^r \operatorname{erfc}\frac{h_1-z}{2\sqrt{\mu x}} \right. \\
& + \frac{\mu}{(-\nu)^3} e^{\nu(h_1+z)+\mu x\nu^2} \operatorname{erfc}\left[\frac{h_1+z}{2\sqrt{\mu x}} + \nu\sqrt{\mu x}\right] - \frac{\mu}{(-\nu)^3} \sum_{r=0}^2 [-2\nu\sqrt{\mu x}]^r \operatorname{erfc}\frac{h_1+z}{2\sqrt{\mu x}} \left. \right\} \\
& - F_2 \cdot e^{\alpha x} \cdot \left(\frac{\mu}{\alpha}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left\{ e^{-z\sqrt{\frac{\alpha}{\mu}}} \operatorname{erfc}\left[\frac{z}{2\sqrt{\mu x}} - \sqrt{\alpha x}\right] - e^{-z\sqrt{\frac{\alpha}{\mu}}} \operatorname{erfc}\left[\frac{z}{2\sqrt{\mu x}} + \sqrt{\alpha x}\right] \right\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + b_0 \cdot e^{-\alpha x} \cdot \left(\frac{\mu}{\alpha}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left\{ e^{-z \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\mu}}} \operatorname{erfc}\left[\frac{z}{2\sqrt{\mu x}} - \sqrt{\alpha x}\right] - e^{z \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\mu}}} \operatorname{erfc}\left[\frac{z}{2\sqrt{\mu x}} + \sqrt{\alpha x}\right] \right\} + \dots \\
& + a_0 z^2 + b_0 z + c_0 + 2\mu a_0 x \}
\end{aligned} \tag{5-63}$$

(iii)

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{第2内部境界面 (} z = h_2 \text{) において,} & \frac{\partial c}{\partial z} = F_2 \\ \text{底面 (} z = h \text{) において,} & \frac{\partial c}{\partial z} = F_3 \\ \text{起点 (} x = 0 \text{) において,} & c = c_0 e^{-\frac{z}{h_1}} \end{array} \right.$$

$\beta = \mu/h_1^2$ とおく一方, (i) と同様にして,

$$\begin{aligned}
c = & e^{-\alpha x} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ -\frac{1}{2} \left\{ F_3 \cdot e^{-\alpha x} \cdot \left(\frac{\mu}{\alpha}\right)^{\frac{1}{2}} + \frac{c_0}{eh_1} \cdot e^{-\beta x} \cdot \left(\frac{\mu}{\beta}\right)^{\frac{1}{2}} \right\} \cdot \left\{ e^{-\{(2n+1)h_1-z\}\sqrt{\frac{\alpha}{\mu}}} \right. \right. \\
& \cdot \left(\operatorname{erfc}\left[\frac{(2n+1)h_1-z}{2\sqrt{\mu x}} - \sqrt{\alpha x}\right] - \operatorname{erfc}\left[\frac{(2n+1)h_1-z}{2\sqrt{\mu x}} + \sqrt{\beta x}\right] \right) \\
& - e^{-\{(2n+1)h_1+z\}\sqrt{\frac{\alpha}{\mu}}} \cdot \left(\operatorname{erfc}\left[\frac{(2n+1)h_1+z}{2\sqrt{\mu x}} - \sqrt{\alpha x}\right] - \operatorname{erfc}\left[\frac{(2n+1)h_1+z}{2\sqrt{\mu x}} + \sqrt{\beta x}\right] \right) \left. \right\} \\
& - \frac{1}{2} \left\{ F_2 \cdot e^{-\alpha x} \cdot \left(\frac{\mu}{\alpha}\right)^{\frac{1}{2}} + \frac{c_0}{h_1} \cdot e^{-\beta x} \cdot \left(\frac{\mu}{\beta}\right)^{\frac{1}{2}} \right\} \cdot \left\{ e^{-\{2(n+1)h_1-z\}\sqrt{\frac{\alpha}{\mu}}} \right. \\
& \cdot \left(\operatorname{erfc}\left[\frac{2(n+1)h_1-z}{2\sqrt{\mu x}} - \sqrt{\alpha x}\right] - \operatorname{erfc}\left[\frac{2(n+1)h_1-z}{2\sqrt{\mu x}} + \sqrt{\beta x}\right] \right) - e^{-\{2nh_1+z\}\sqrt{\frac{\alpha}{\mu}}} \\
& \cdot \left(\operatorname{erfc}\left[\frac{2nh_1+z}{2\sqrt{\mu x}} - \sqrt{\alpha x}\right] - \operatorname{erfc}\left[\frac{2nh_1+z}{2\sqrt{\mu x}} + \sqrt{\beta x}\right] \right) \left. \right\} + c_0 \cdot e^{-\beta x} \cdot e^{-\frac{z}{h_1}} \left. \right\}
\end{aligned} \tag{5-64}$$

(2) 最上層 (表水層) および中間層 (変水層)

最上層の表水層では, その境界条件が

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{表水層 (} z = 0 \text{) において,} & \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \\ \text{第1内部境界面 (} z = h_1 \text{) において,} & \frac{\partial c}{\partial z} = F_1 \end{array} \right.$$

であるため, (I) の最下層の解において, $F_2 = 0$, $F_3 \rightarrow F_1$, さらに $h_1 \rightarrow h_m (= h_2 - h_1)$ とすれば

よい。

また、前述の(1)，(2)の場合の三層状態とは少し異なるが，1つの躍層が強大で二層状態と見なせる場合の理論解を図5-11に示す。この図より精度の高いFiの値が与えられれば，かなり適合度のよい結果が得られる。

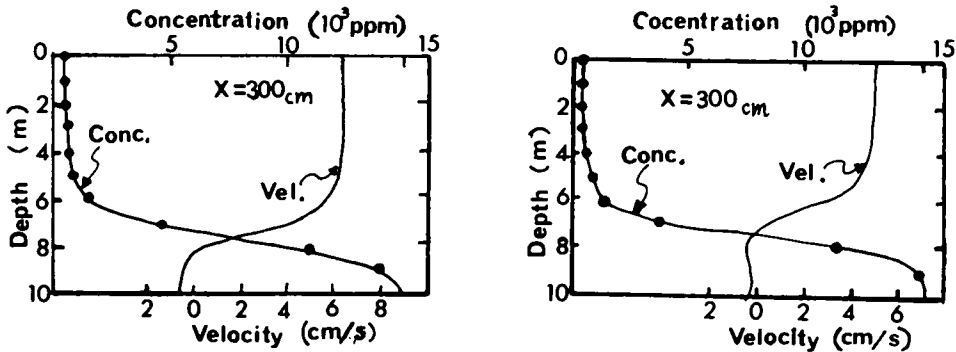


図5-11 解析解

そして，鉛直分布の流下方向の変化に注目する場合は，時間変化の項を無視して，

$$u \frac{\partial c}{\partial x} + w \frac{\partial c}{\partial z} = E_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + E_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \kappa c \quad (5-65)$$

さらに，鉛直方向の流速が小さくて対流項が省略でき，流下方向(x方向)の拡散項が小さく無視できる場合は簡略化されて次式(5-66)となる。

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = E_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \kappa c \quad (5-66)$$

ここで， $\frac{E_z}{u} \rightarrow E'_z$ ， $\frac{\kappa}{u} \rightarrow \kappa'$ とおき， $x \rightarrow t$ とすれば(5-58)と同様に解析解を得ることができる。

この溶解性物質の変化の式(5-55)の差分式による近似解は前節の浮遊性物質の場合と同様に計算できる。

4-2 溶 存 ガ ス

貯水池の水質として重要な溶存ガスは，酸素と二酸化炭素である。他のメタンガス(CH_4)や硫化水素(H_2S)は深水層の嫌気状態でも最悪の場合に見られる程度であり，その量はあまり多くない。また，窒素ガスは大気中に多量に存在することと，硝酸態窒素，亜硝酸態窒素，アンモニア態窒素および窒素ガスの間の硝化・脱窒作用を通して関係するくらいである。酸素と二酸化炭素は，植物プランクトンなどの光合成作用およびプランクトンや細菌などの呼吸作用と直接関係して増加減少の変化をする。したがって，ここでは，微生物学的作用および溶存する還元性物質による変化，それに再曝気現象を伴うこの両者についての解析を行う。

まず，溶存酸素については，実際の観測資料をもとにした統計解析手法によって貯水池の全体的な変化を把握する。すなわち，第3章第3節の調和分析の結果より，その1年を周期とする調和波の各地点および各水深における変化特性による解析法である。

つぎに，上記のマクロの変化式よりさらに物質移動現象論的に，流動および反応による変化を考慮した

拡散方程式に基く解析について述べる。これは後の第5節の水質と生態系の関係とも関連する問題である。

また、二酸化炭素については、その pH およびアルカリ度との関係式による推定法があり、これに統計解析を加える方法について論じることにする。

まず、表5-5に解析の一例として膳棚地点の溶存酸素飽和度についての調和結果を示し、表5-6に、調和分析に基づく関数近似式による計算値の1年間の各水深での変化を示している。表層および底層では、植物プランクトンの光合成作用および循環による混合結果がその調和波の変化とよく対応している。とくに、1年を周期とする調和波をとり出して、平均値、振幅、初期位相角の各地点、各水深での変化を示したのが図5-12である。これより、振幅および平均値は水深に対して直線的に変化するが、位相角については、水深3~8mの間で大きく変化する。また、合流点の振幅変化は他の地点と逆勾配となっている。

したがって、水深 z (m) が $z < 13$ と $z > 13$ の2つの場合に分けて、流下距離 x (km) で水深 z (m) の溶存酸素飽和度 c (%) は次式で表わされる。(表5-7参照)

$z < 13$ m に対しては、

$$c = (112 - 1.4 \times x) + (17 + 0.96 \times z) \cdot \cos \left(\frac{\pi}{6} t - \alpha \right) \quad (5-67)$$

$z > 13$ m に対しては、

$$c = (112 - 1.4 \times x) + (17 + 0.96 \times z) \cdot \cos \left\{ \frac{\pi}{6} t - (-2.16 + 0.005 \times x) \right\} \quad (5-68)$$

ここで、 $\alpha = 1.27 \cdot (x + 4)^{\frac{1}{3}}$ である。

(2) 炭酸ガス

生物の呼吸・分解作用や植物プランクトンの光合成作用と関係する一方、炭酸塩濃度とは pH やアルカリ度を介して平衡関係にある。すなわち、水中に溶存している炭酸ガスは遊離炭酸として、pH およびアルカリ度と次式で表わされる関係²¹⁾がある。

$$\text{pH} = \log \frac{\text{アルカリ度} \times 0.88}{[\text{CO}_2] \times K} \quad (5-69)$$

したがって、MacInnes & Belcher の平衡定数 $K = 4.54 \times 10^{-7}$ を用いると、

$$\log [\text{CO}_2] = \log (\text{アルカリ度}) - \log (0.1934 \times 10^{-7}) - \text{pH} \quad (5-70)$$

ゆえに、

$$[\text{CO}_2] = [\text{アルカリ度}] \cdot \log^{-1} [6.2874 - \text{pH}] \quad (5-71)$$

また、Saunders, Trama および Bachman²⁰⁾ による修正式は、炭素量として次式で表わされる。

$$C(\text{mg}/\ell) = T \cdot \left(\frac{0.24 H^2 + 0.24 H K_1 + 0.24 K_1 K_2}{H K_1 + 2.0 K_1 K_2} \right) \quad (5-72)$$

ここで、 T : アルカリ度、

H : 水素イオン濃度、

表5-5 溶存酸素飽和度の調和分析結果（膳棚地点）

水深 (m)	系 列 平均値	12 カ月 周期			6 カ月 周期			4 カ月 周期			3 カ月 周期		
		振 幅	位相角	分散比	振 幅	位相角	分散比	振 幅	位相角	分散比	振 幅	位相角	分散比
0	1.064	0.194	1.217	53.9	0.037	5.024	1.9	0.029	0.315	1.2	0.027	0.489	1.1
1	1.068	0.214	1.235	58.6	0.034	4.703	1.5	0.025	0.125	0.8	0.026	0.544	0.9
3	1.001	0.146	0.918	39.3	0.051	5.710	4.7	0.064	0.647	7.6	0.047	1.889	4.1
5	0.818	0.134	5.929	28.8	0.078	0.323	9.8	0.020	1.579	0.6	0.021	4.084	0.7
8	0.771	0.042	5.475	53.3	0.061	0.869	4.4	0.058	4.068	4.0	0.041	5.419	2.0
10	0.735	0.057	5.465	48.6	0.043	4.598	1.7	0.079	4.787	5.5	0.024	0.369	0.5
13	0.680	0.077	5.436	51.5	0.050	1.984	1.6	0.070	4.907	3.2	0.019	0.734	0.2
15	0.622	0.091	5.412	60.4	0.048	2.317	1.3	0.044	5.088	1.0	0.026	5.959	0.4
18	0.481	0.124	5.549	76.6	0.080	3.222	2.6	0.037	5.763	0.5	0.019	5.160	0.5
20	0.432	0.127	5.611	82.5	0.086	3.608	2.9	0.056	1.430	1.2	0.029	5.234	0.3
23	0.319	0.122	5.708	79.2	0.112	4.187	5.1	0.068	4.224	1.9	0.045	0.277	0.8
備 考	位相角はラジアン、分散比は%												

表5-6 溶存酸素飽和度の近似式による計算値（膳棚地点）

水深 月	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
0	1.194	1.196	1.169	1.249 [△]	1.239	1.119	1.004	0.880	0.841 [○]	0.903	0.936	1.036
1	1.185	1.204	1.201	1.289 [△]	1.263	1.118	0.995	0.874	0.831 [○]	0.892	0.934	1.031
3	1.169	1.218 [△]	1.018	1.021	1.157 [○]	1.035	0.889	0.871	0.831 [○]	0.866	0.942	0.995
5	1.065 [△]	1.033	0.906	0.725	0.708 [○]	0.802	0.814	0.822	0.861	0.858	0.914	1.027
8	0.949	0.795	0.781	0.651 [○]	0.430	0.514 [○]	0.725	0.787	0.830	0.865	0.911	1.014 [△]
10	0.919	0.666	0.608	0.670	0.548	0.447 [○]	0.586	0.717	0.756	0.855	0.994	1.055 [△]
13	0.874	0.701	0.608	0.572	0.392	0.276 [○]	0.474	0.726	0.815	0.857	0.917	0.948 [△]
15	0.843	0.634	0.535	0.467	0.279	0.218 [○]	0.385	0.600	0.793	0.892	0.898	0.927 [△]
18	0.765	0.532	0.403	0.295	0.125	0.013 [○]	0.054	0.301	0.649	0.843	0.890	0.902 [△]
20	0.738	0.558	0.379	0.185	0.058	0.044 [○]	0.001	0.104	0.524	0.861	0.892 [△]	0.840
23	0.703	0.396	0.300	0.299	0.056	0.000 [○]	0.029	0.116	0.282	0.658	0.904 [△]	0.902
備 考	各水深の最高値を△、最低値を○で示す。											

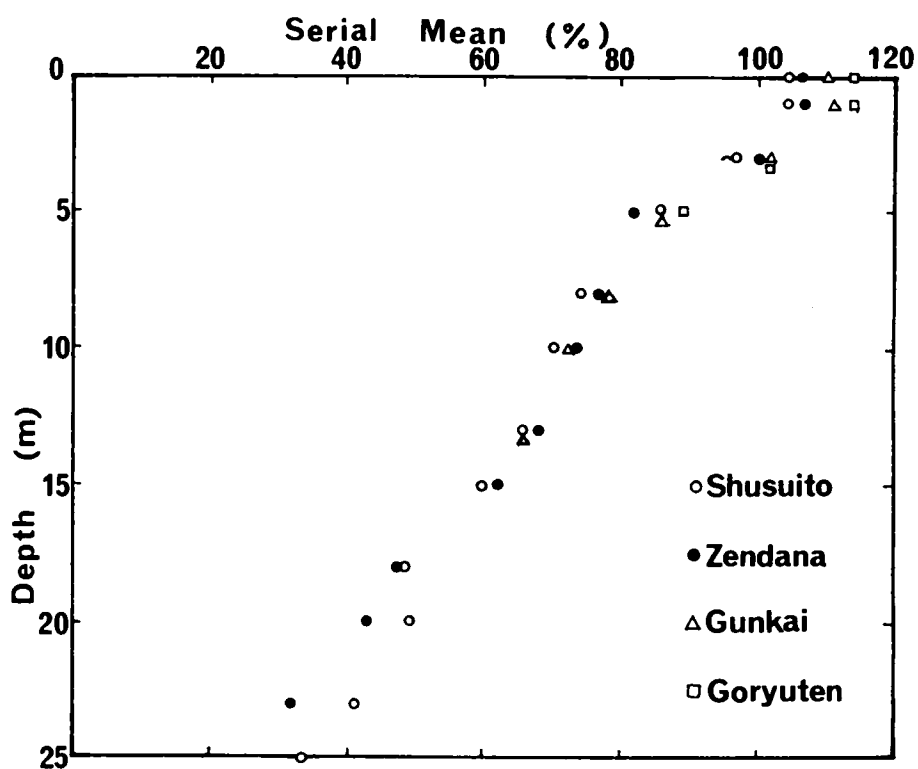


図 5 - 12 (a) DO 飽和度の系列平均値の鉛直分布

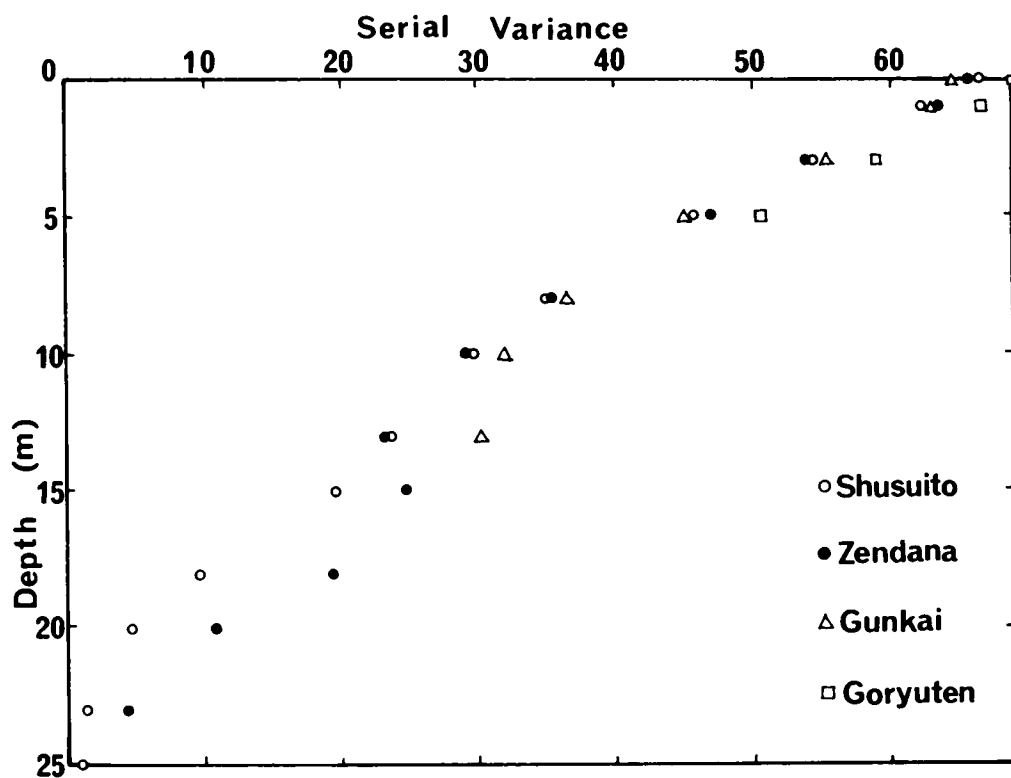


図 5 - 12 (b) DO 飽和度の系列分散の鉛直分布

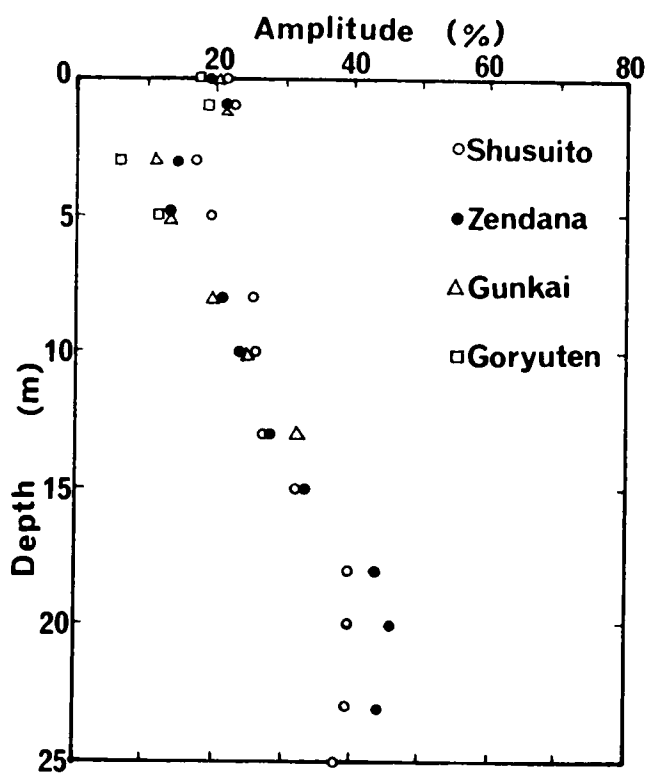


図 5 - 12 (c) DO 飽和度の振幅の鉛直分布

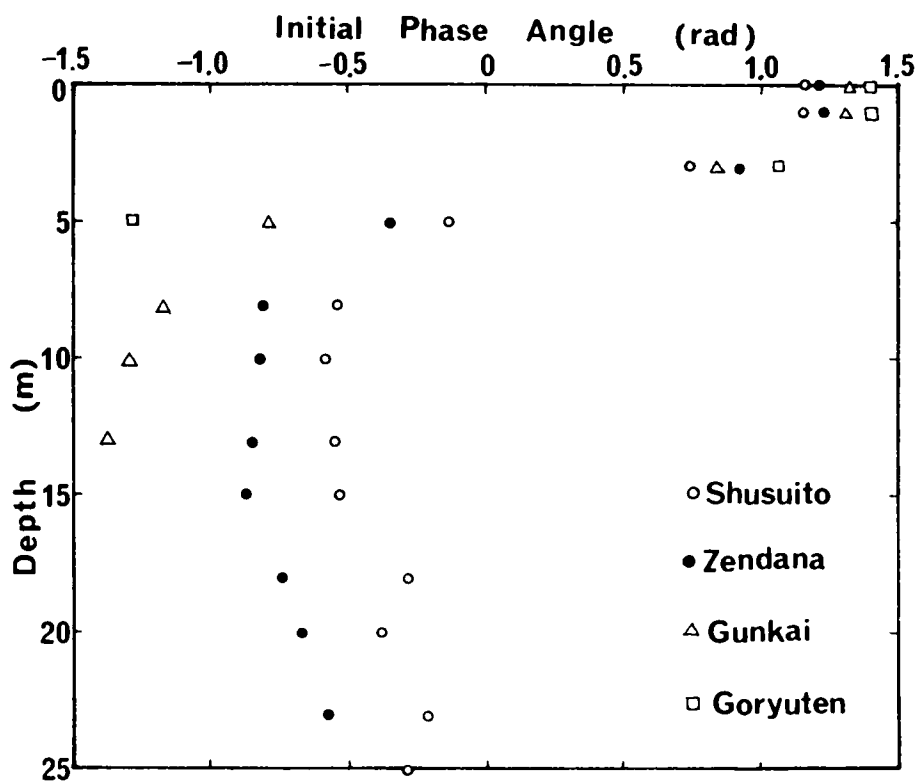


図 5 - 12 (d) DO 飽和度の初期位相角の鉛直分布

表 5 - 7

	取 水 塔 前	膳 棚	郡 界	合 流 点
平 均 値	105-2.86×z (m) %	106-3.12×z(m) %	108-3.53×z(m) %	112-3.75×z(m) %
振 幅	20+0.77×z (m) %	17+1.11×z (m) %	15+1.00×z(m) %	18-1.67×z(m) %
位 相 角 $\begin{cases} z < 13 \\ z > 13 \end{cases}$	$1.27 \cdot (x+4)^{\frac{1}{3}}$ $-0.96+0.0308 \times z \text{ (rad)}$	$1.27 \cdot (x+4)^{\frac{1}{3}}$ $-1.20+0.025 \times z \text{ (rad)}$	$1.27 \cdot (x+4)^{\frac{1}{3}}$ —	$1.27 \cdot (x+4)^{\frac{1}{3}}$ —

K_1, K_2 : 温度と pH から計算される溶解度定数,

さらに, 遊離炭酸は酸度によっても計算することができる。すなわち,

$$\text{遊離炭酸 (CO}_2 \text{ ppm)} = \text{総酸度 (CaCO}_3 \text{ ppm)} \times 0.88 \quad (5-73)$$

ここで, 式 (5-67)において, 平衡定数 K は温度の関数として表わされるから,

$$\text{pH} = \log \{ (\text{アルカリ度}) \times 0.88 / \{ (\text{CO}_2) \times K_0 (1 + a \times \theta) \} \} \quad (5-74)$$

ここで, $\begin{cases} \theta : \text{水温 (}^\circ\text{C)} \\ K_0 : T = 0 \text{ のときの } K \text{ の値} \end{cases}$

したがって,

$$[\text{CO}_2] = \{ (\text{アルカリ度}) \times 0.88 \} / \{ K_0 (1 + a \times \theta) \times \log (\text{pH}) \} \quad (5-75)$$

この式によって, 昭和 41 年度から昭和 48 年度までのアルカリ度, 水温, および pH のデータをもとに遊離炭酸 (CO_2) を求めて膳棚地点の水深 1 m について示したものが図 5-13 である。この図より, 4 月～9 月の光合成の盛んな時期には CO_2 濃度は減少して 0 に近く, 秋季から春季にかけて ppm (mg/l) のオーダーで存在する。この変化はちょうど溶存酸素の飽和度の増減とは逆の関係で, その変化はよく対応している。

第 5 節 富栄養化傾向と生態系

生態系と水質変化の関係は, これに光量や流動などの環境条件を加えて, システム生態学的に取り扱うことができる。とくに表水層では, 光合成作用により炭水化物や栄養塩などの無機物質から有機物質への変換を行なう植物プランクトンは, 第 1 次生産として食物連鎖における基礎を形成する重要なものである。また深水層では, いくつかの食物連鎖を経て, 最終的な分解作用で有機物質から無機物質への変換を受け持つ細菌は, 栄養塩の回帰などと関係する。この植物プランクトンや細菌は, それぞれ, 表水層でも表面近くの表層, 深水層や温度躍層付近での作用が顕著であり, 水質の生物学的変化として注目されるものである。

まず, 生態系, とくに植物プランクトンの水質への直接的な影響は, 光合成および呼吸作用を通じて, pH, 溶存酸素飽和度およびアルカリ度に現われ, 逆に水質の植物プランクトンへの影響は, 無機態の窒素とリンが光合成の制限因子として関係する。また, 環境条件としては水温, 日射量および日照時間が重要な因子と考えられる。

したがって, 生物のうちで水質変化と最も関係の深い植物プランクトンの変化について, 栄養塩および環境条件を考慮した偏微分方程式による挙動解析を行なう。また, 細菌に関しては経年変化や周年変化を

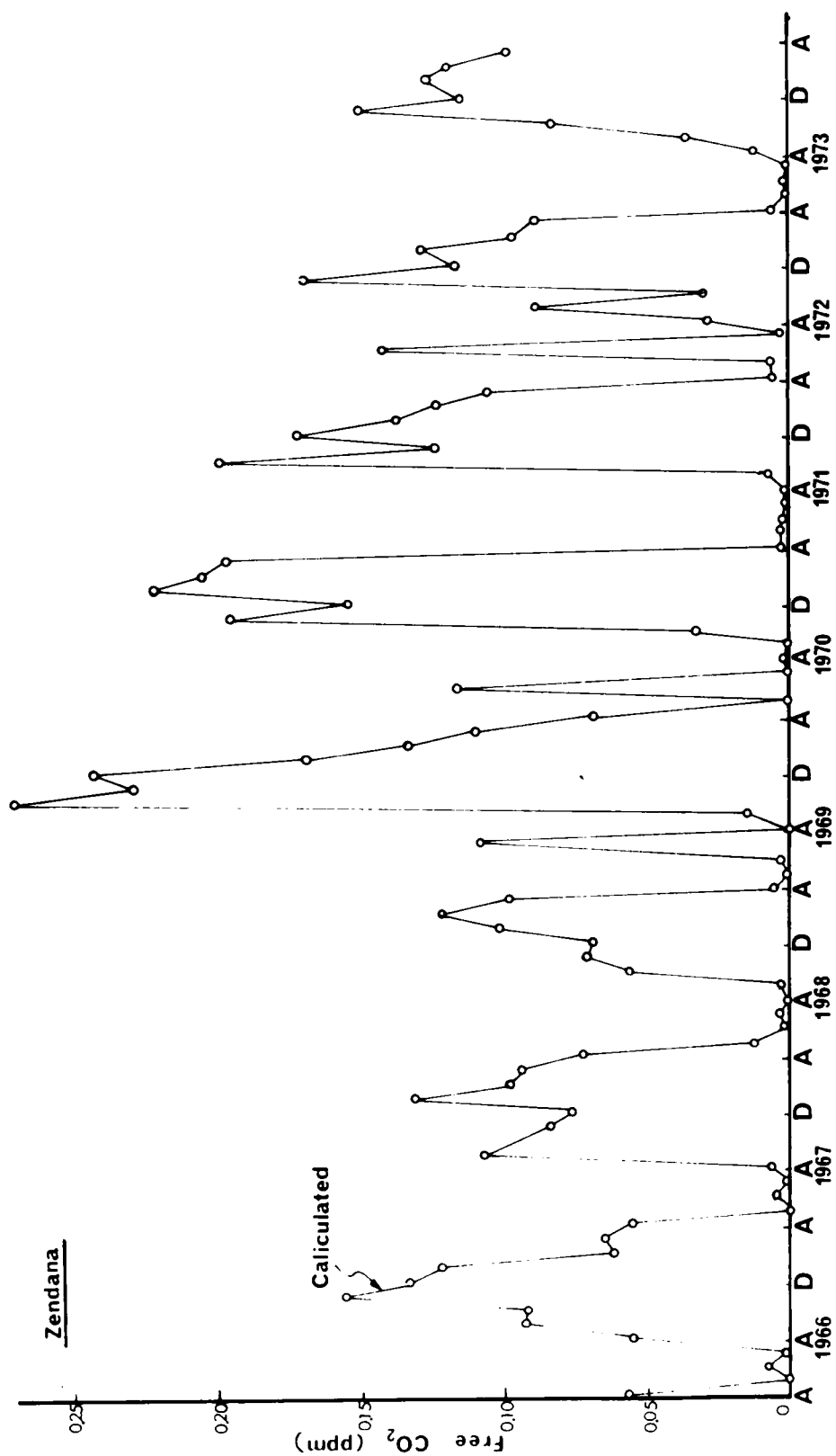


図 5 - 13 遊離炭酸濃度の経年変化 (計算値, 膳柳地点)

中心として水質変化との関係を求めることになる。

さらに、植物プランクトンの増減に対する水質変化の応答の例として溶存酸素について物質移動論的な解析を加えることにする。また、炭酸ガスについては、pH およびアルカリ度との関係式に基いた時系列解析を第4節で行なっている。

したがって、以下の解析を、富栄養化の時系列解析を中心とするものと、決定論的解析モデル（偏微分方程式）を中心とする水質変化と生態系との関係のものに分けてまとめることにする。

5-1 富栄養化傾向の時系列解析

貯水池の富栄養化過程は、その原因としての流入水による汚濁負荷量の増大、結果としての貯水池内の植物プランクトン濃度の上昇として見る事ができる。したがって、まず、流入水の栄養塩の負荷量の経年変化および季節変化を第3章での貯留水についてと同様に時系列解析によって定量的に把握し、それに対応する貯水池内の栄養塩濃度の変化の時系列解析結果と比較検討し、つぎの水質と生態系との関係に利用することになる。また、流入水の濃度変化は貯水池内の合流点や郡界地点などの水質変化と似た傾向を示すが、貯水池内の流動や生物作用の影響を受けていないという特性を有する。

水質因子としては、昭和43年からデータの蓄積のある無機態窒素について、流入水の濃度と負荷量の経年変化および季節変化を求める一方、リンおよびBODについてはデータのそろっている昭和49年の1年間データから流入水の濃度および負荷量の季節変化を扱った。また、流入水の汚濁指標として、過マンガン酸カリウム消費量およびアルカリ度の経年変化も求めている。この流入水の無機態窒素、過マンガン酸カリウム消費量、アルカリ度の年平均値の経年変化を、あまり変動のない塩素イオンの年平均値とともに図5-14に示し、その月変動は以下に詳述する。

(1) 無機態窒素

まず、流入河川の波豆川と羽束川それぞれの流入水の月別の濃度変化を図示したものが図5-15であり、その時系列解析では、毎年ほぼ同様の季節変化パターンを示しながら、全体として年々増加の長期傾向が認められ、つぎの二式で表わされる変化を示す。

波豆川：

$$\begin{aligned} \text{濃度 } C_N (\text{ppm}) = & (0.263 + 0.00122 \times t) + (0.102 + 0.00135 \times t) \times \{ 0.683 \\ & \times \cos\left(\frac{\pi}{6}t - 5.588\right) + 0.095 \times \cos\left(\frac{\pi}{3}t - 3.212\right) + 0.273 \\ & \times \cos\left(\frac{\pi}{2}t - 1.819\right) + 0.346 \times \cos\left(\frac{2}{3}\pi t - 3.555\right) \} \end{aligned} \quad (5-76)$$

羽束川：

$$\begin{aligned} \text{濃度 } C_N (\text{ppm}) = & (0.276 + 0.00264 \times t) + (0.103 + 0.00060 \times t) \\ & \times \{ 0.794 \times \cos\left(\frac{\pi}{6}t - 5.691\right) + 0.114 \times \cos\left(\frac{\pi}{3}t - 5.031\right) + 0.131 \end{aligned}$$

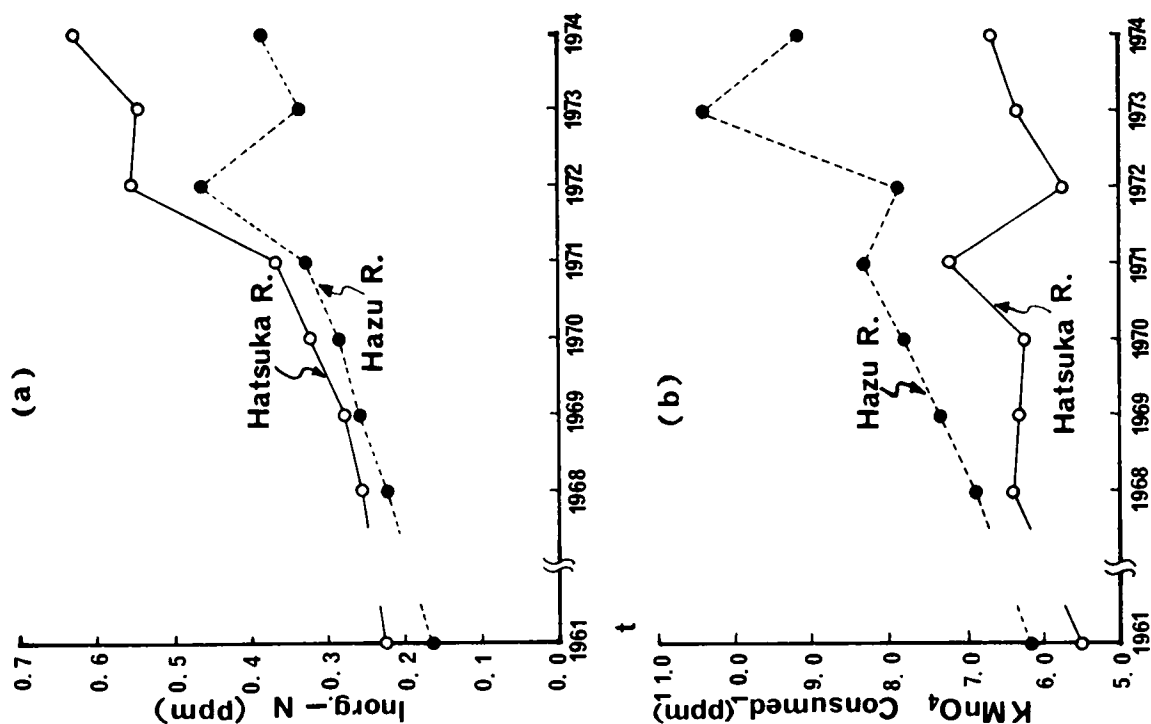


図5-14 流入河川水質の経年変化

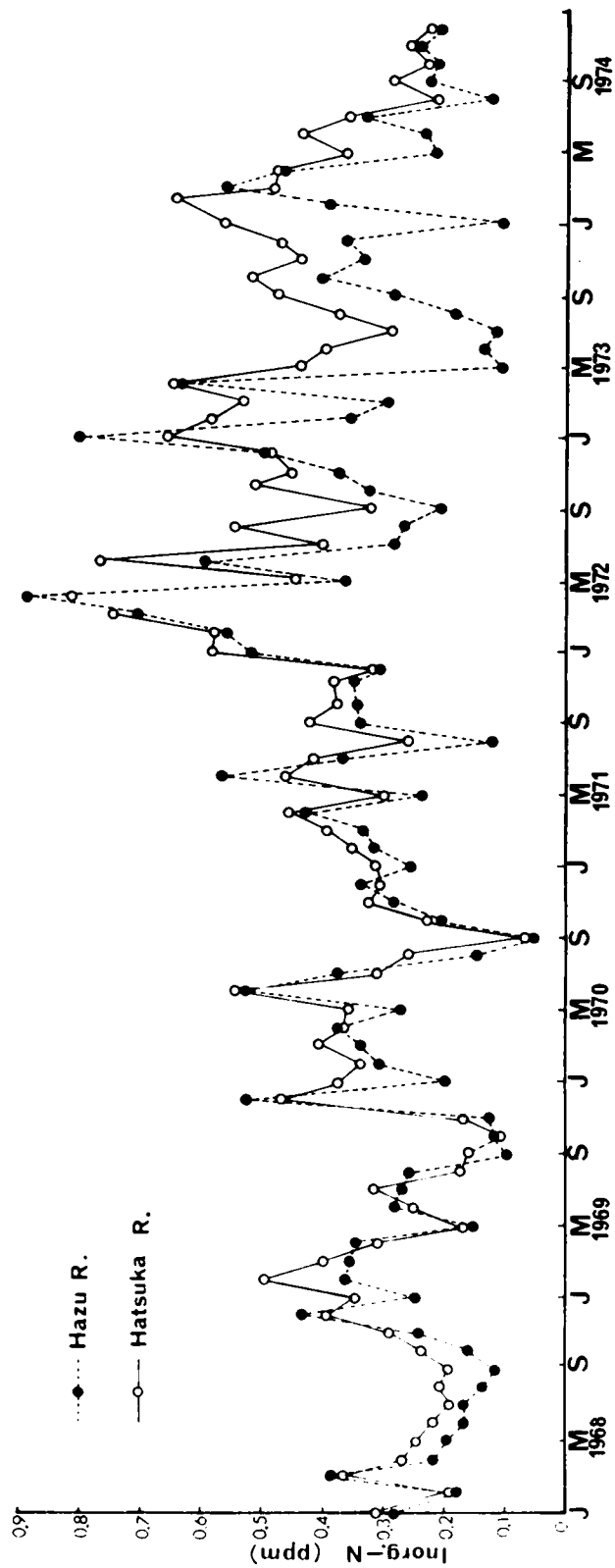


図 5 - 15 流入水の無機態窒素濃度の経年変化 (千荷貯水池)

$$\times \cos\left(\frac{\pi}{2}t - 0.848\right) + 0.224 \times \cos\left(\frac{2}{3}\pi t - 5.657\right)\} \quad (5-77)$$

ただし、ここで、 t =時間(月)、 $t=0$ を昭和43年4月とする。

上式による関数表示が実際の変化をカバーする割合は33%前後であるが、その平均値や勾配、および初期位相角は、第3章第4節の合流点、郡界、膳棚、取水塔前各地点の変化パターンと比較して、平均濃度は高く、勾配および初期位相角はほとんど似た値を示している。

また、過去の人口および生産活動の動態に関する資料の不足のため波豆川、羽束川および貯水池周辺よりの流入水による負荷量を推定し、その推定値の経年変化の時系列解析を行なった。毎日の流量観測値に対して水質濃度の測定は月1回のため、毎月1回の観測値を当月の平均濃度と見なして2つの方法で解析を試みた。これは、汚濁原単位と流出係数の積ではなく、一月1回の濃度測定値と当日の流量の積から1日の負荷量を実積値として求め、(当月の合計流量)/(当日の流量)の流量比を掛けることによって当月の負荷量とするものと、当日の負荷量と当月の日数の積を当月の負荷量とする2つである。しかし後者は、測定当日の流量大小が負荷量に大きく影響して、このような小河川では各月間のバラつきが大きく、時系列解析には不適当であることを知った。流量係数による負荷量の経年変化を表わしたものが図5-16であり、その時系列解析結果は次式となる。

$$\text{負荷量 } W_N \text{ (ton/月)} = (2.468 + 0.01332 \times t) + (2.712 + 0.01087 \times t) \times \{0.630$$

$$\times \cos\left(\frac{\pi}{6}t - 0.785\right) + 0.046 \times \cos\left(\frac{\pi}{3}t - 4.469\right) + 0.229$$

$$\times \cos\left(\frac{\pi}{2}t - 1.185\right) + 0.442 \times \cos\left(\frac{2\pi}{3}t - 3.912\right)\} \quad (5-78)$$

この関数近似式が実際の変化をカバーする割合は31%と低い、これは一月の流入水量が大きかった昭和45年6月や昭和47年4月、6月、7月、9月のピークが大きいためである。また、その負荷量変化と濃度変化の1年周期変動成分の初期位相角より、濃度変化のピークが負荷量変化のピークより先に現われることがわかる。これは月別負荷量の月別流量に左右される度合が、濃度のそれより大きいからであると考えられる。また、これより昭和48年の無機態窒素の負荷量は、第2章第1節の汚濁原単位より算出した負荷量とはほぼ同じ大きさの値を示している。この式によると、昭和55年4月には4.8 ton/月、昭和60年4月には5.2 ton/月と昭和43年4月の2倍以上の推定値が得られる。

(2) リン酸イオン (PO_4^{3-})

PO_4^{3-} の測定が波豆川および羽束川の表層水のそれぞれ1サンプルについての昭和49年1年間のデータ、さらに、波豆および羽束流量観測点における水深方向の数サンプルの昭和49年1年間のデータが神戸市水道局によってとられている。両河川水の PO_4^{3-} 濃度は、図5-17のようにそれぞれの流量観測点の水深方向の平均値より高く、とくに波豆川の濃度が高いのが目立つ。この濃度をもとに無機態窒素と同様に流入水として、濃度に流量をかけた1日負荷量を求め、さらに(当月流量)/(当日流量)の流量比を掛けた1カ月負荷量の変化パターンを示したものが図5-18である。また、1日負荷量に

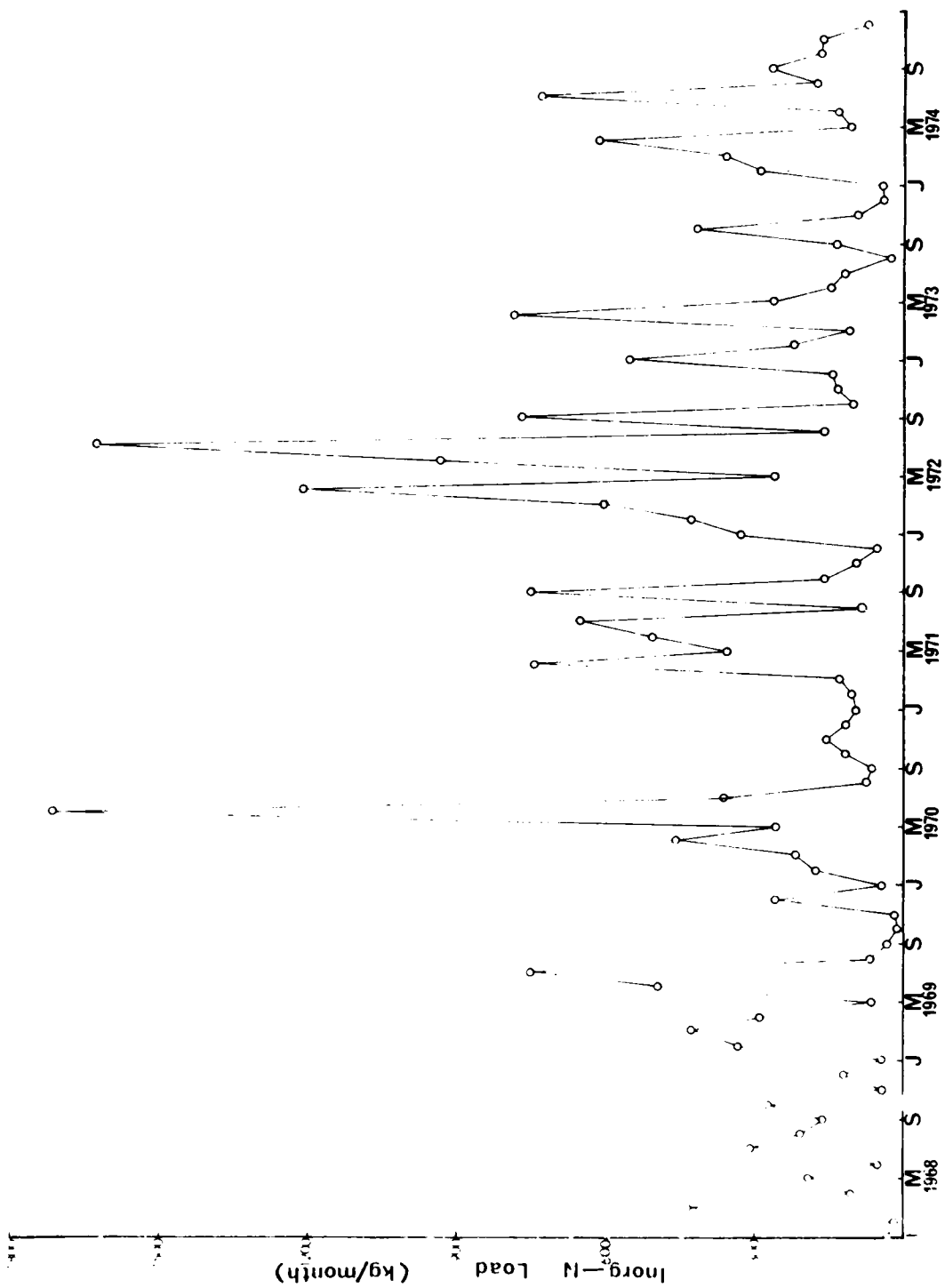


図 5 - 16 流入水の無機態窒素負荷量の経年変化 (千胡貯水池)

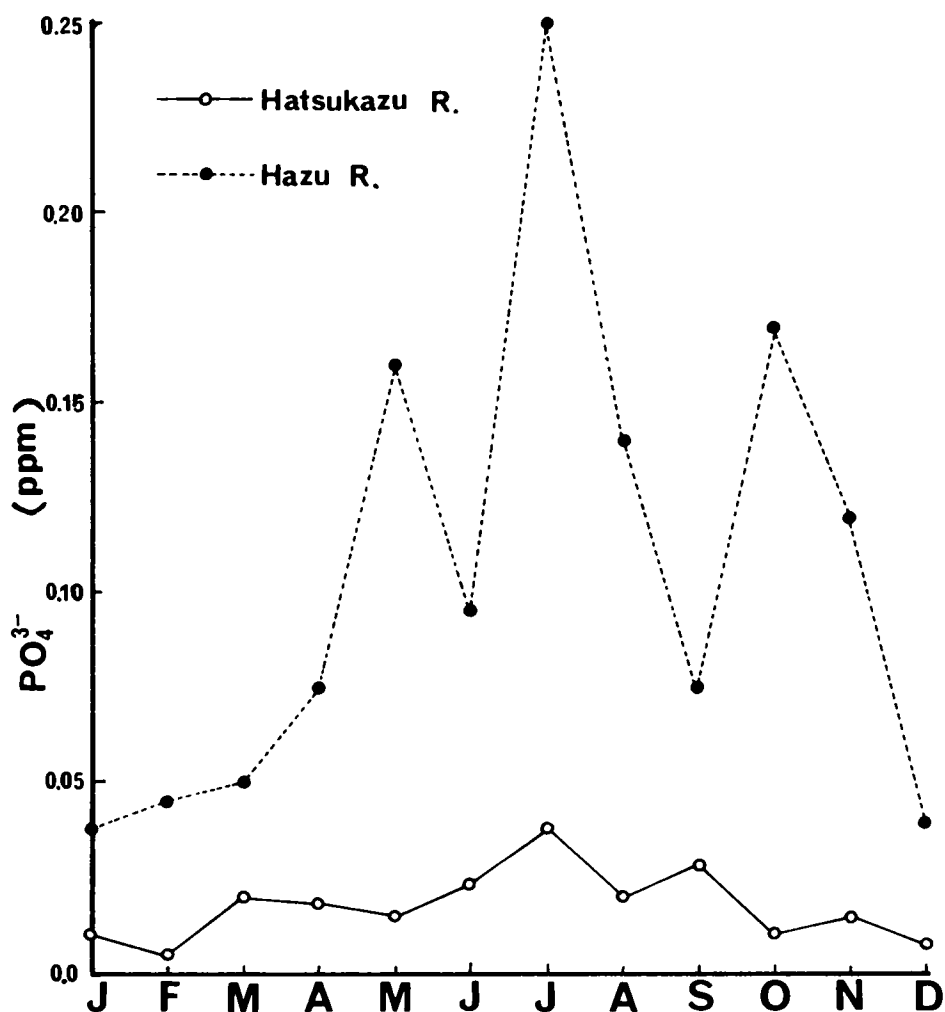


図5-17 流入河川水の PO_4^{3-} の周年変化 (1974年)

その月の日数をかけた1カ月負荷量の変化パターンも参照のために同じ図に加えてある。これらは春および秋の小さなピークに多少の相違があるが、7月の大きなピークは一致する。その1年間の変化パターンを調和分析によって関数表示したものが以下の式になる。

波豆川：

$$\begin{aligned}
 \text{濃度 } C_p (\text{ppm}) = & 0.105 + 0.065 \times \cos\left(\frac{\pi}{6}t - 1.837\right) + 0.108 \times \cos\left(\frac{\pi}{3}t - 0.141\right) \\
 & + 0.026 \times \cos\left(\frac{\pi}{2}t - 4.335\right) + 0.041 \times \cos\left(\frac{2\pi}{3}t - 0.806\right) \quad (5-79)
 \end{aligned}$$

羽束川：

$$\begin{aligned}
 \text{濃度 } C_p (\text{ppm}) = & 0.018 + 0.010 \times \cos\left(\frac{\pi}{6}t - 1.552\right) + 0.003 \times \cos\left(\frac{\pi}{3}t - 5.526\right) \\
 & + 0.004 \times \cos\left(\frac{\pi}{2}t - 5.093\right) + 0.004 \times \cos\left(\frac{2\pi}{3}t - 5.121\right) \quad (5-80)
 \end{aligned}$$

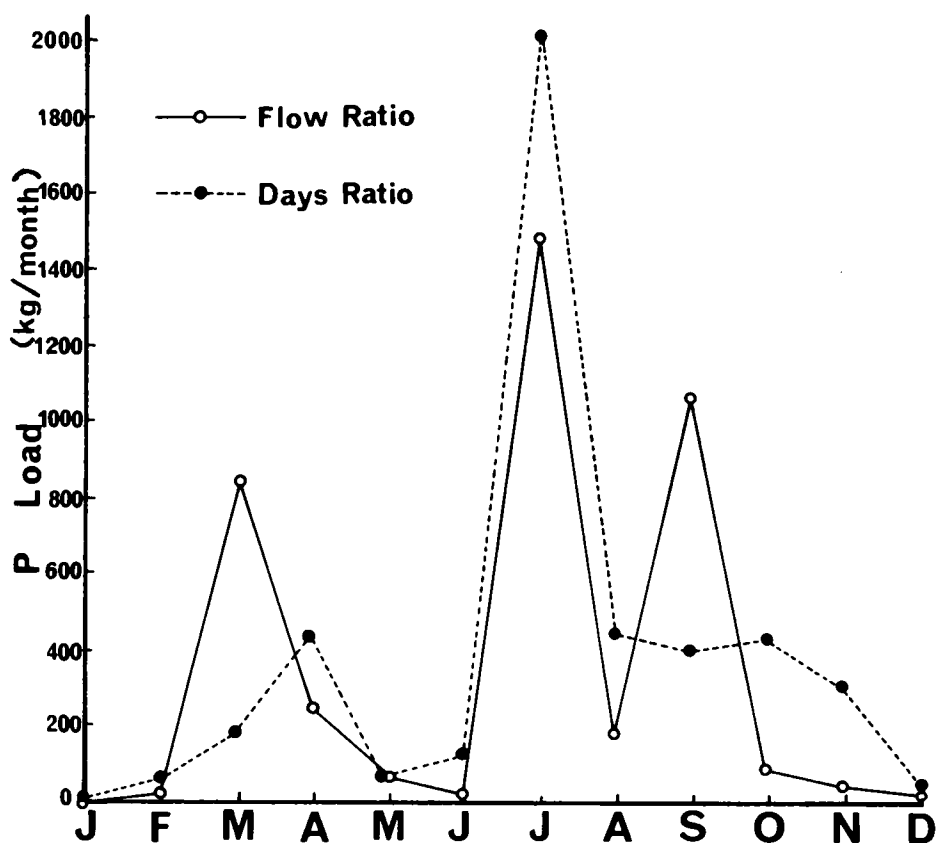


図5-18 流入水のリン負荷量の周年変化(1974年)

流入水：

$$\begin{aligned}
 \text{負荷量 } W_p (\text{kg/月}) = & 380.8 + 410.3 \times \cos\left(\frac{\pi}{6}t - 1.793\right) + 185.5 \times \cos\left(\frac{\pi}{3}t - 3.573\right) \\
 & + 343.4 \times \cos\left(\frac{\pi}{2}t - 4.863\right) + 349.5 \times \cos\left(\frac{2\pi}{3}t - 0.047\right)
 \end{aligned}
 \tag{5-81}$$

ただし、 t =時間(月)、 $t=0$ は4月である。

この濃度変化の1年間のパターンは第3章第4節の貯水池内の各地点でのそれとほぼ一致した変化を示すことがその比較によって認められる。

(3) BOD

水質汚濁指標のBODのデータは、昭和49年1年間の波豆川および羽束川の流入水と、取水塔前の3地点について測定値があり、この1年間の変化パターンを示したものが図5-19(a)である。さらに、波豆川および羽束川の流量を考慮して、測定当日の1日負荷量を算定し、(当月流量)/(当日流量)の流量比を掛けた1カ月負荷量の変化パターンが図5-19(b)に示してある。この図中には、1カ月負荷量を(当日負荷量)×(当月の日数)としたものも参照のために加えてある。BODの濃度および負

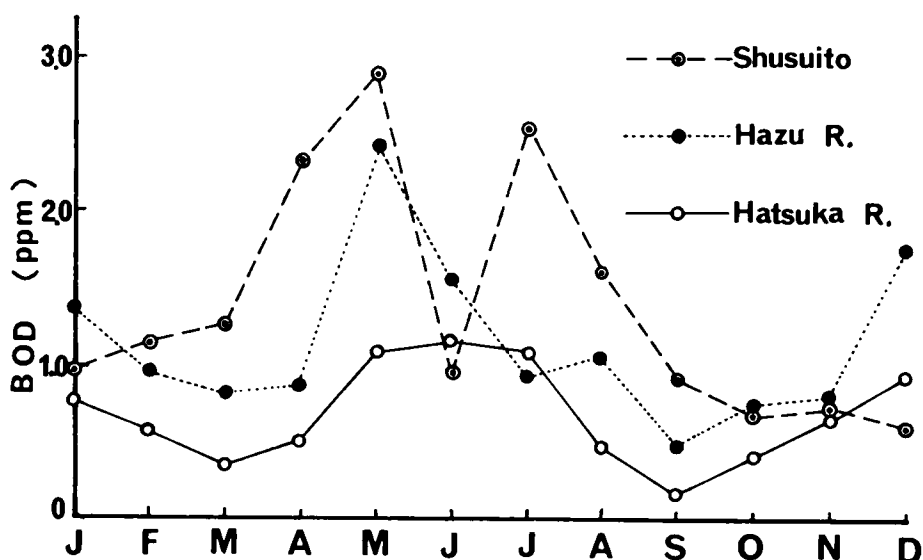


図 5 - 19 (a) BOD の周年変化 (1974年)

荷量 (流量比による) の変化パターンの調和分析による関数表示式は以下になる。

波豆川：

$$\begin{aligned}
 \text{濃度 } C_{\text{BOD}}(\text{ppm}) = & 1.14 + 0.280 \times \cos\left(\frac{\pi}{6}t - 0.062\right) + 0.497 \times \cos\left(\frac{\pi}{3}t - 1.943\right) \\
 & + 0.300 \times \cos\left(\frac{\pi}{2}t - 1.330\right) + 0.194 \times \cos\left(\frac{2\pi}{3}t - 2.687\right)
 \end{aligned}
 \quad (5-82)$$

羽束川：

$$\begin{aligned}
 \text{濃度 } C_{\text{BOD}}(\text{ppm}) = & 0.68 + 0.161 \times \cos\left(\frac{\pi}{6}t - 0.589\right) + 0.397 \times \cos\left(\frac{\pi}{3}t - 2.182\right) \\
 & + 0.045 \times \cos\left(\frac{\pi}{2}t - 3.440\right) + 0.034 \times \cos\left(\frac{2\pi}{3}t - 1.301\right)
 \end{aligned}
 \quad (5-83)$$

取水塔前：

$$\begin{aligned}
 \text{濃度 } C_{\text{BOD}}(\text{ppm}) = & 1.38 + 0.845 \times \cos\left(\frac{\pi}{6}t - 0.731\right) + 0.066 \times \cos\left(\frac{\pi}{3}t - 0.549\right) \\
 & + 0.297 \times \cos\left(\frac{\pi}{2}t - 0.101\right) + 0.449 \times \cos\left(\frac{2\pi}{3}t - 1.015\right)
 \end{aligned}
 \quad (5-84)$$

流入水：

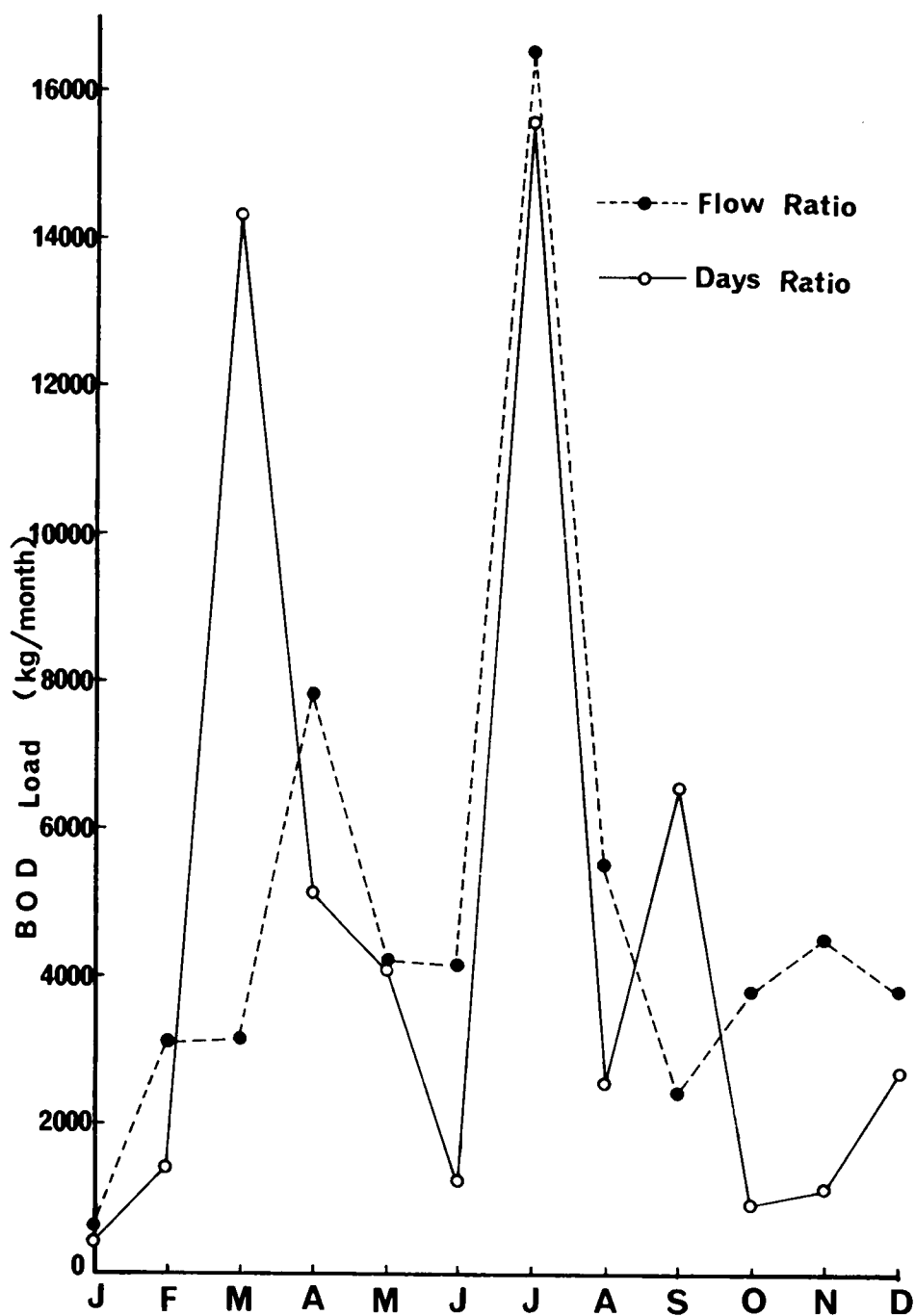


図5-19 (b)流入水BOD負荷量の周年変化(1974年)

$$\begin{aligned}
 \text{負荷量 } W_{\text{BOD}}(\text{ton/月}) &= 5.005 + 3.001 \times \cos\left(\frac{\pi}{6}t - 1.388\right) + 1.174 \times \cos\left(\frac{\pi}{3}t - 2.854\right) \\
 (\text{流量比による}) & \\
 &+ 3.019 \times \cos\left(\frac{\pi}{2}t - 5.054\right) + 2.293 \times \cos\left(\frac{2\pi}{3}t - 0.242\right) \\
 &\hspace{15em} (5-85)
 \end{aligned}$$

ここで、 t :時間(月)、 $t=0$ を4月とする。

これらの図および式より春の3月から5月にかけてのピーク、そして7月のピークが顕著である。

(4) 過マンガン酸カリウム消費量

これは千苺貯水池の過去7年間の流入水について、データの蓄積がないBODやCODに代って、その有機性汚濁の変化を知る貴重な水質因子である。この KMnO_4 消費量は、栄養塩の窒素やリンと同様に図5-20に示すように梅雨期に大きなピークを見せ、水田の多い羽束川流域では無機態窒素が波豆川流域より大きい値を示したが、 KMnO_4 消費量は波豆川流域の方が大きい値を示す。これは波豆川が流程が短いにもかかわらず、河岸における人家の密集度合が大きいなどの理由によるものと考えられ、栄養塩と有機性汚濁物の負荷特性の相違がわかる。この両流入河川の時系列解析による KMnO_4 消費量変化の調和波による関数表示は以下ようになる。

波豆川:

$$\begin{aligned}
 \text{濃度 } C_{\text{KMnO}_4}(\text{ppm}) &= (6.681 + 0.0402 \times t) + (1.424 + 0.0244 \times t) \\
 &\times \left[0.985 \times \cos\left(\frac{\pi}{6}t - 2.018\right) \right] \\
 &\hspace{15em} (5-86)
 \end{aligned}$$

羽束川:

$$\begin{aligned}
 \text{濃度 } C_{\text{KMnO}_4}(\text{ppm}) &= (6.168 + 0.00709 \times t) + (2.045 + 0.00732 \times t) \\
 &\times \left[1.023 \times \cos\left(\frac{\pi}{6}t - 2.050\right) \right] \\
 &\hspace{15em} (5-87)
 \end{aligned}$$

ただし、 t :時間(月)、 $t=0$ を昭和43年4月とする。

この両式がその変動をカバーする度合は、それぞれ上記の1年周期だけでそれぞれ、46%、54%であり、その他半年、4カ月および3カ月周期のものは数%以下と小さく省いてある。

(4) アルカリ度

アルカリ度は、炭酸塩濃度との密接な関係とは別に、下水や工場廃水などの影響によっても変化が著しく、水質汚濁の指標にもなりうる水質因子であり、その経年変化は KMnO_4 消費量と同様に年々増加の長期傾向を示す。図5-21のようにその時系列解析による濃度変化の関数表示式は以下ようになる。

波豆川:

$$\text{濃度 } C_{\text{アルカリ}}(\text{ppm}) = (14.057 + 0.1505 \times t) + (1.233 + 0.1227 \times t) \times \{0.760$$

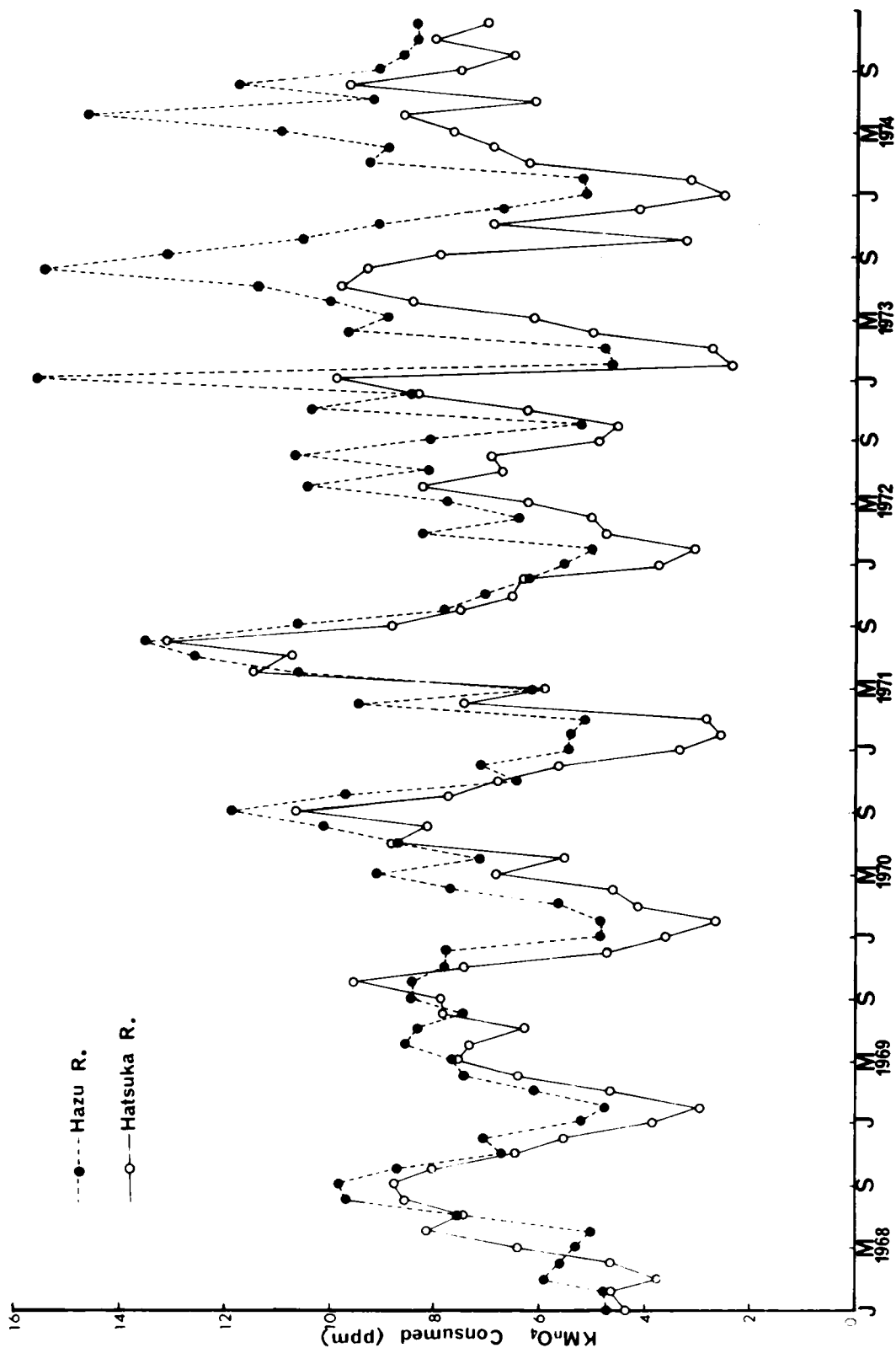


図 5 - 20 流入河川水の KMnO_4 消費量の経年変化 (千那貯水池)

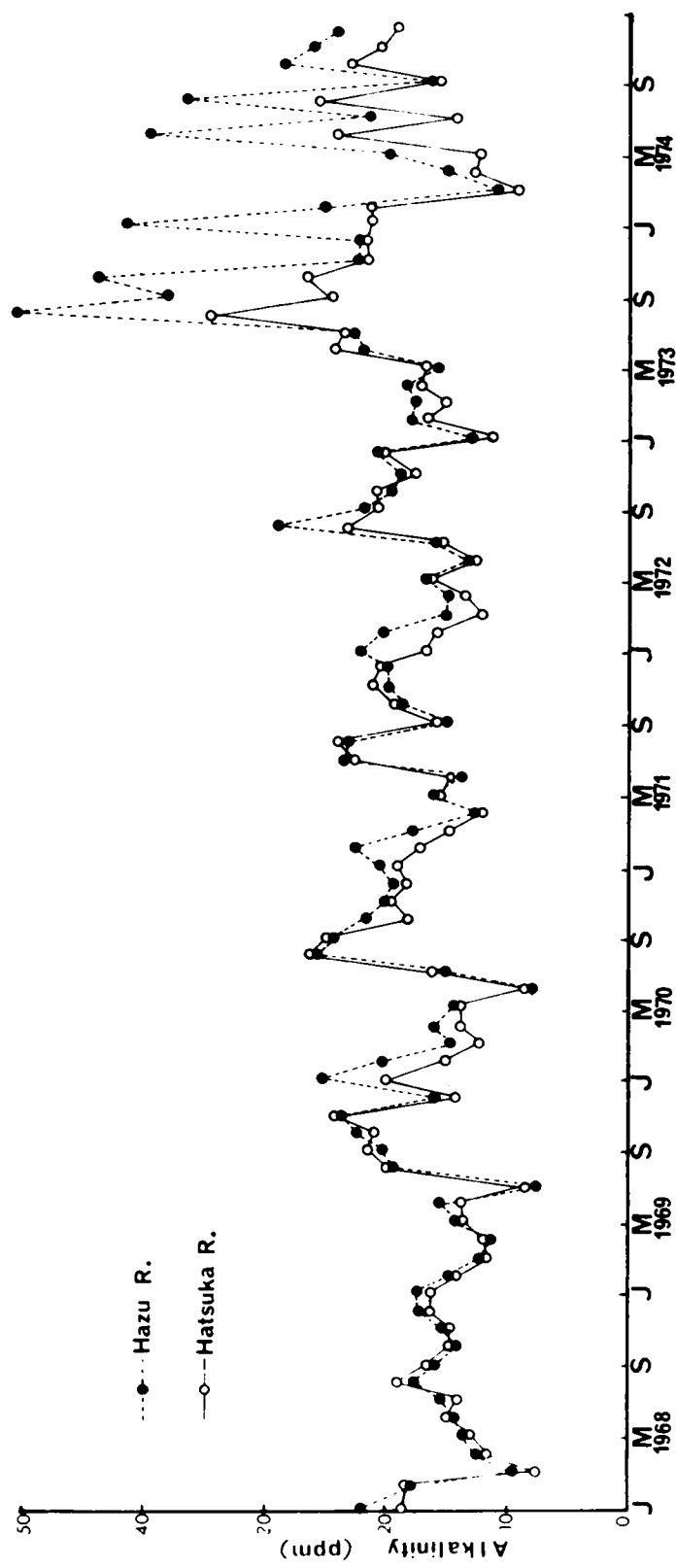


図 5 - 21 流入河川水のアルカリ度の経年変化 (千苅貯水池)

$$\begin{aligned} & \times \cos\left(\frac{\pi}{6}t - 3.484\right) + 0.678 \times \cos\left(\frac{\pi}{3}t - 5.190\right) + 0.513 \\ & \times \cos\left(\frac{\pi}{2}t - 4.841\right) + 0.454 \times \cos\left(\frac{2\pi}{3}t - 6.079\right) \} \quad (5-88) \end{aligned}$$

羽束川：

$$\begin{aligned} \text{濃度 } C_{\text{アルカリ}} (\text{ppm}) = & (14.815 + 0.0671 \times t) + (2.777 + 0.0508 \times t) \times \{ 0.871 \\ & \times \cos\left(\frac{\pi}{6}t - 2.993\right) + 0.341 \times \cos\left(\frac{\pi}{3}t - 2.993\right) + 0.254 \\ & \times \cos\left(\frac{\pi}{3}t - 4.253\right) + 0.370 \times \cos\left(\frac{2\pi}{3}t - 0.436\right) \} \quad (5-89) \end{aligned}$$

ただし、 t ：時間（月）であり、 $t=0$ は昭和43年4月とする。

この両式のうち、波豆川については、その変動の35%をカバーするだけであるが、流量の大きい羽束川については、その変動の51%をカバーし、1年周期が優勢である。

以上のように、流入水の各種水質因子の濃度および負荷量の経年変化および季節変化のパターンを明らかにしたが、これらと汚濁原因との関係について検討してみる。まず、栄養塩の無機態窒素の増加は、図5-22に示す肥料の使用量の増加^{23,24)}に伴う流出量の増加と対応すると考えられる。これは、土地利用では農林業が中心であり、塩素イオン量の経年変化が小さく、人口の増減による影響は小さいと考えられるからである。そして、無機態窒素およびリンの季節変化は、肥料の出荷や入荷の変動²⁵⁾（図5-23）と一定の時間遅れのある農作業の施肥時期との関係が認められ、経年変化も農業および畜産業との関係を反映している。

また、 KMnO_4 消費量、アルカリ度およびBODの変化は、図5-24に示される汚濁原単位の増加²⁶⁾生活様式の変化によると考えられ、その季節変化は流量と生産活動パターンに左右されるものとする。

そして、これらの原因に対応する貯水池内での応答として、植物プランクトン濃度の季節変化も含む各月の値の経年変化を図5-25(a)に示し、その年平均値としての経年変化を図5-25(b)に示してある。後者の図と、無機態窒素負荷量の経年変化（図5-16）との比較から、日数比の無機態窒素負荷量の変化、植物プランクトンの変化は、その昭和45年のピークともよく似ており、その対応関係が見られる。

また、この貯水池へ流入する両河川水の流入端での流入水としての水質変化は、貯水池貯留水の流動状態によって異なる緩衝作用を通して、その程度を和らげられて貯留水に伝わり、その水質変化をひき起こすことになる。それは、第3章で述べた貯水池流入部の合流点から流出部の取水塔前までの水質変化の外挿部（あるいは延長部）として取り扱うことができるが、その変化の幅は貯水池貯留水の場合よりも大きく、その変化の位相は貯留水の場合より先にずれることになる。

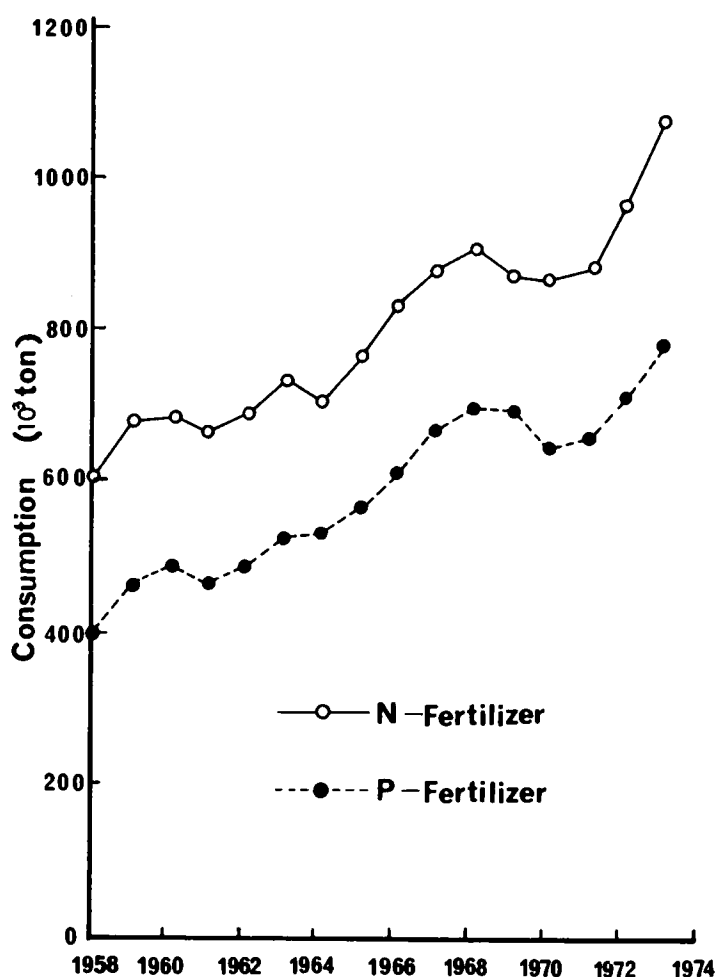


図5-22 肥料の国内消費量の経年変化²³⁾

5-2 水質と生態系との相関

水質と生態系との関係は、生物濃度が希薄な間は明確には認めにくいですが、貧栄養から中栄養、中栄養から富栄養への富栄養化過程とともに、その関係は密接なものとなる。水質と関係の深い生物は植物プランクトンと細菌である。動物プランクトンは植物プランクトン濃度の増減に左右され、それに対応した変化、すなわち、ある「時間遅れ (time lag)」を有する変化を示すことが多い。

ここでは、動物プランクトン量は少いため食物連鎖の1次生産の担い手である植物プランクトンの表層での挙動と、最終段階である有機物質から無機物質への分解を受けもつ細菌の深水層や温度躍層での挙動に注目して、考察することになる。

(I) 植物プランクトンの変化

植物プランクトンの濃度変化を表わす基本方程式は、反応を有する浮遊性物質と見なして第5章第3節より非定常2次元の反応項を有する浮遊性物質に関する収支式の拡大適用を試みる。湖沼に比べて流動性に富む貯水池では、その水質変化特性から流速や拡散の影響を無視して流下方向や水深方向の分布変

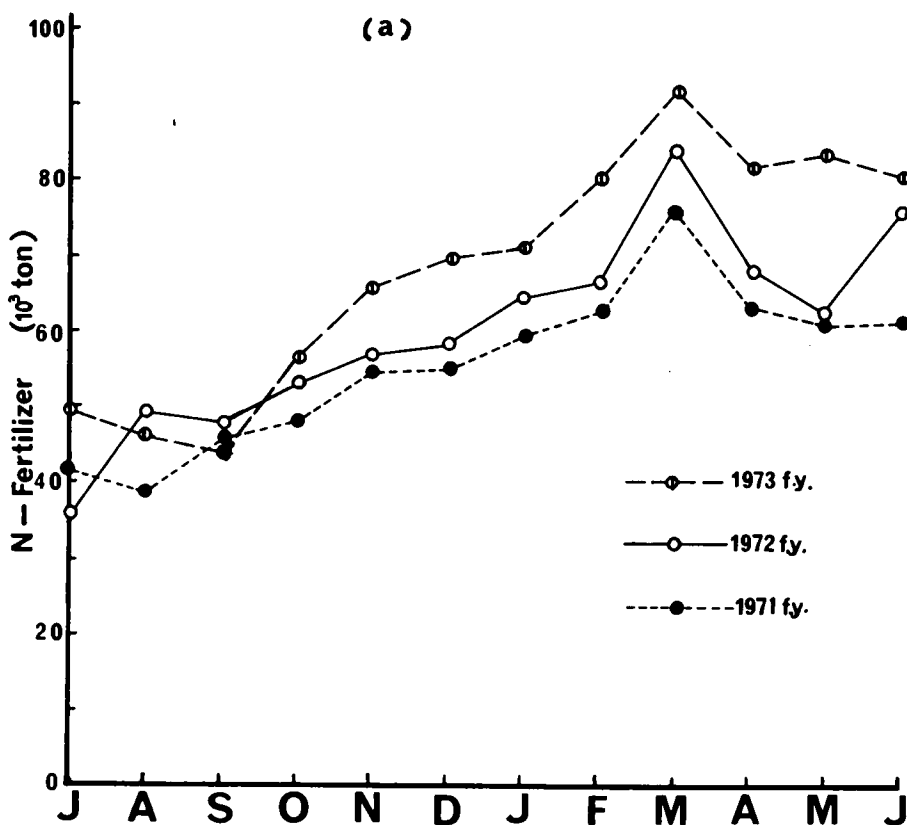


図 5 - 23 (a)窒素肥料の国内向出荷変動²³⁾

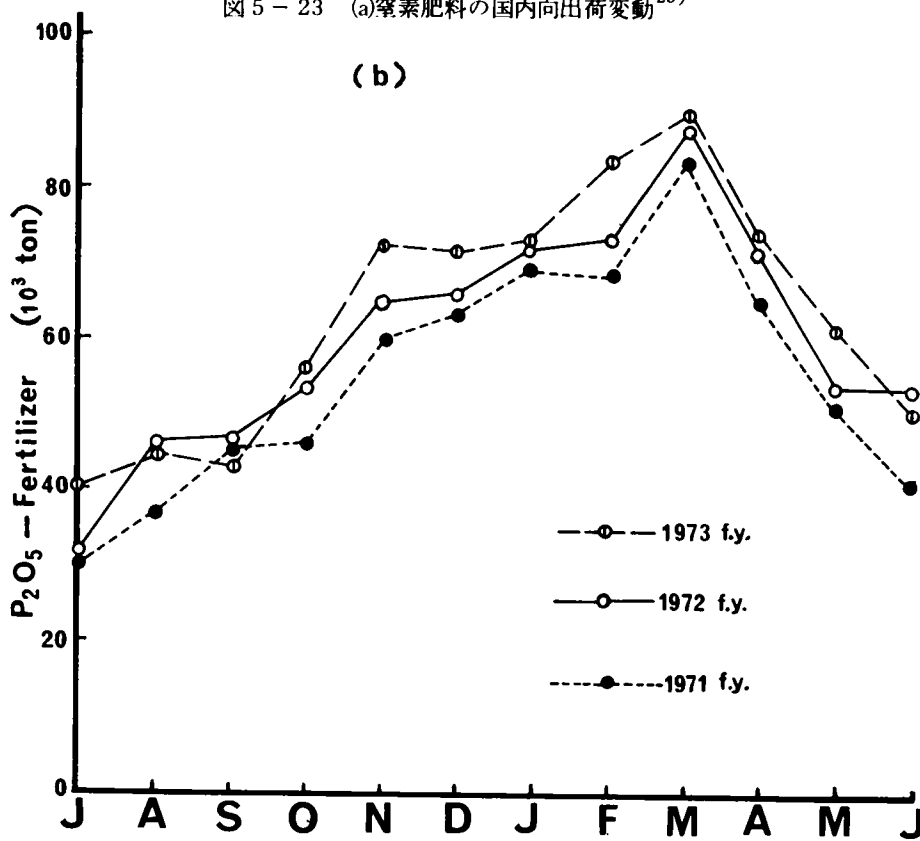


図 5 - 23 (b)リン酸肥料の国内向出荷変動²³⁾

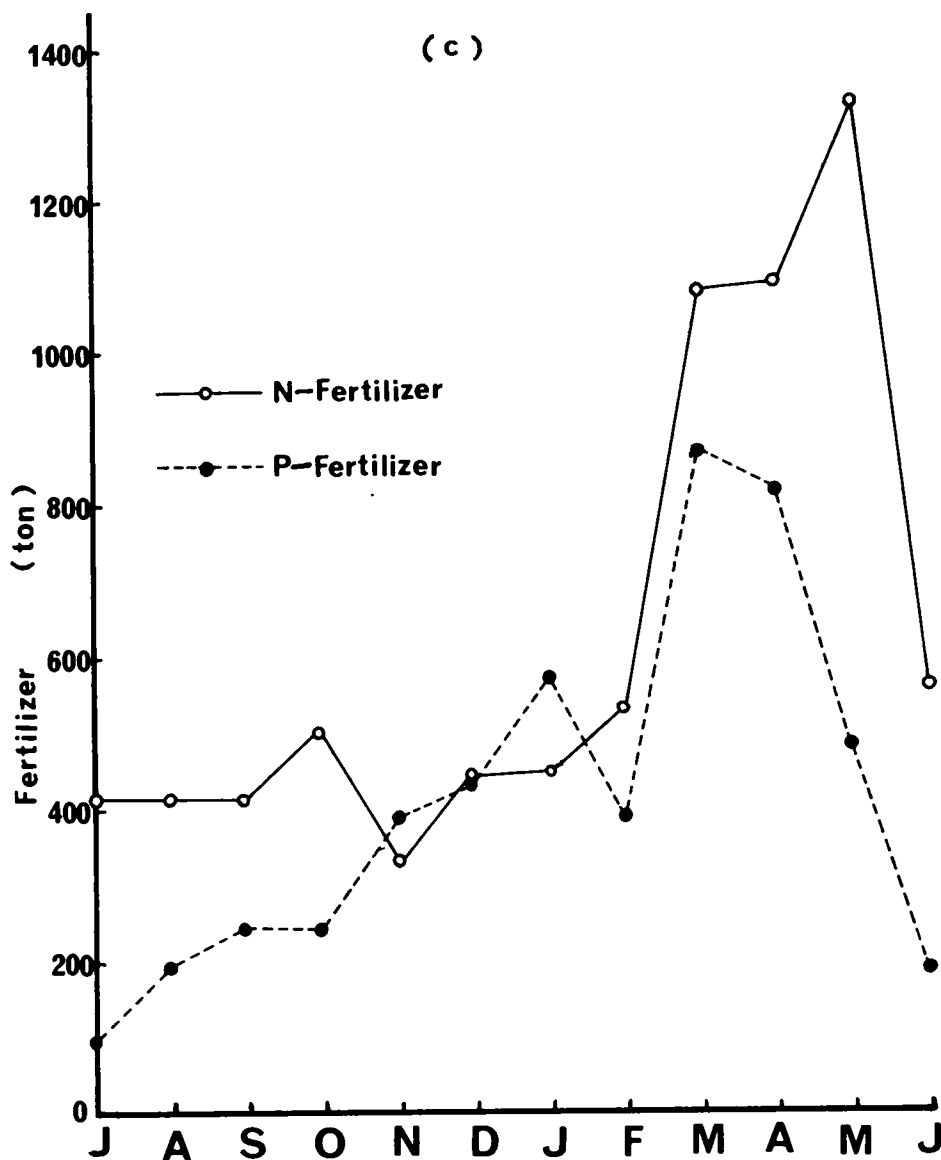


図5-23 (c)肥料の月別入荷見込数量の変化(京都府：1974肥年)²⁵⁾

化を説明しえない。したがって浮遊性物質や溶解性物質の変化と同様の乱流拡散方程式で取り扱えることがこの手法の利点となる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + w \frac{\partial c}{\partial t} = E_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + E_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - w_0 \frac{\partial c}{\partial z} - \kappa c \quad (5-90)$$

ここで、 $\left\{ \begin{array}{l} c: \text{植物プランクトン濃度} \\ w_0: \text{植物プランクトンの静止沈降速度} \\ \kappa: \text{植物プランクトンの正味の増殖速度} \end{array} \right.$

$w + w_0 = w_p$ とおくと、

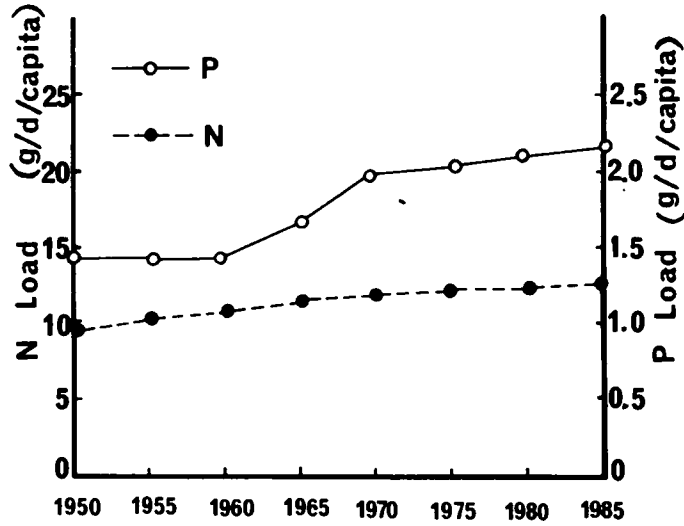


図5-24 家庭下水の栄養塩発生負荷量原単位の変化²⁶⁾

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + w_p \frac{\partial c}{\partial z} = E_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + E_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \kappa c \quad (5-91)$$

この式(5-91)は理論的に解けないため、差分式近似を行ない、電子計算機による数値解を求めることにする。その差分式表示は次式となる。

$$\begin{aligned} & \frac{C(I+1, J, K) - C(I, J, K)}{\Delta t} + U(I, J, K) \times \frac{C(I, J+1, K) - C(I, J-1, K)}{2.0 \times \Delta x} \\ & + W_p(I, J, K) \times \frac{C(I, J, K+1) - C(I, J, K-1)}{2.0 \times \Delta z} = E_x(I, J, K) \\ & \times \frac{C(I, J+1, K) + C(I, J-1, K) - 2.0 \times C(I, J, K)}{\Delta x \times \Delta x} + E_z(I, J, K) \\ & \times \frac{C(I, J, K+1) + C(I, J, K-1) - 2.0 \times C(I, J, K)}{\Delta z \times \Delta z} - \kappa(I, J, K) \\ & \times \frac{C(I+1, J, K) + C(I, J, K)}{2.0} \end{aligned} \quad (5-92)$$

また、境界条件は浮遊性物質として、第5章第3節より

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{水表面 (} z=0 \text{) において, } E_z \frac{\partial c}{\partial z} - wc = 0 \\ \text{第1内部境界面 (} z=h_1 \text{) において, } E_z \frac{\partial c}{\partial z} - k_1 wc = 0 \end{array} \right.$$

この境界条件も同様に差分式表示をすると、

$$\left\{ \begin{array}{l} E_z(I, J, K) \times \frac{C(I, J, K) - C(I, J, K-1)}{\Delta z} - W_p(I, J, K) \end{array} \right.$$

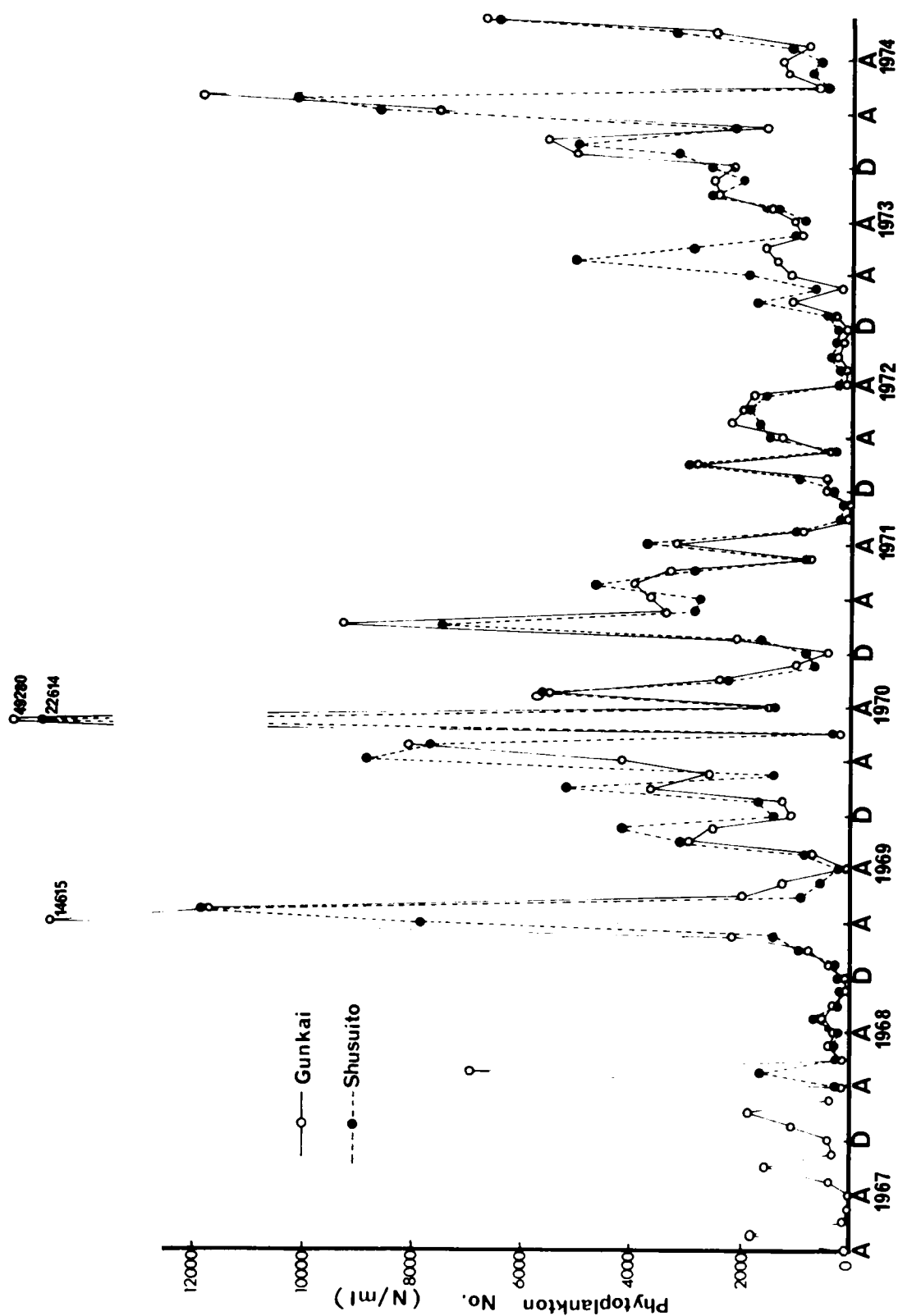


図 5-25 (a) 植物プランクトン濃度の経年変化 (千期貯水池: 取水塔前, 郡界地点)

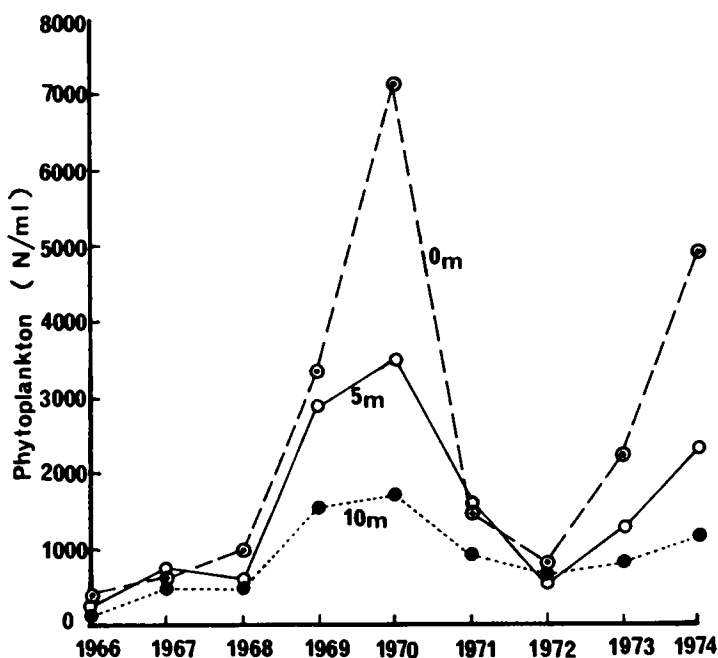


図5-25 (b)植物プランクトン濃度年平均値の変化

$$\left. \begin{aligned}
 & \times \frac{C(I, J, K) + C(I, J, K-1)}{2.0} = 0 \\
 E_z(I, J, K) \times & \frac{C(I, J, K) - C(I, J, K-1)}{\Delta z} - k_1 \times W_p(I, J, K) \\
 & \times \frac{C(I, J, K) + C(I, J, K-1)}{2.0} = 0
 \end{aligned} \right\}$$

ここで、最も重要な $\kappa(I, J, K)$ で表わされる増殖および呼吸あるいは死滅速度について検討する。植物プランクトンの増殖速度は、環境条件としての水温、日射量および日照時間に左右され、栄養塩の制限因子としての窒素およびリン濃度に支配されと考えられる。²⁷⁾

(1) 光 量

光の強さと光合成速度、あるいは増殖速度は、有賀の研究²⁷⁾から図5-26に示されるような関係が見られ、その曲線は一定の水温に対して酵素反応式として用いられる Michaelis-Menten 型の式で近似できる。この図からも、強い光の領域では光合成速度の低下する強光阻害も見られるが、いま適用を考えている水体ではその影響はないものとする。Michaelis-Menten 定数としては、R. V. Thomann²⁹⁾の 60 cal/cm²/day, Cheng-nan Lin³⁰⁾の 43.2 cal/cm²/day の値があるが、後述する日照量の大きさなどから考えて、60 cal/cm²/day の値を用いる。

千荷貯水池での日射量の資料はないため、そのすぐ近くの神戸海洋気象台の観測データを用いることにした。昭和41年度から昭和48年度までの8年間の1カ月毎96個のデータについてコレログラムを求めたのが図5-27であり、明瞭な12カ月周期の変化が見られる。その経年変化はなく、調和

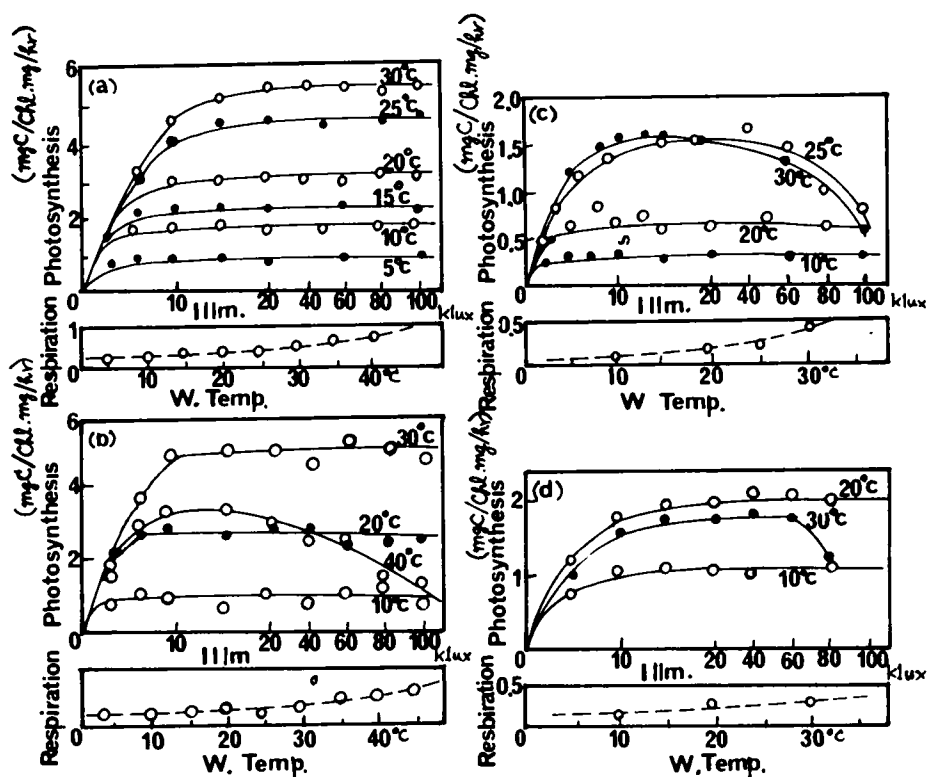


図5-26 種々の温度における光合成 — 光曲線および呼吸温度曲線
(有賀²⁷): 緑藻 *Chlorella ellipsoidea* (a), *Scenedesmus* sp. (b), 藍藻 *Anabaena cylindrica* (c), 珪藻 *Synedra* sp. (d)

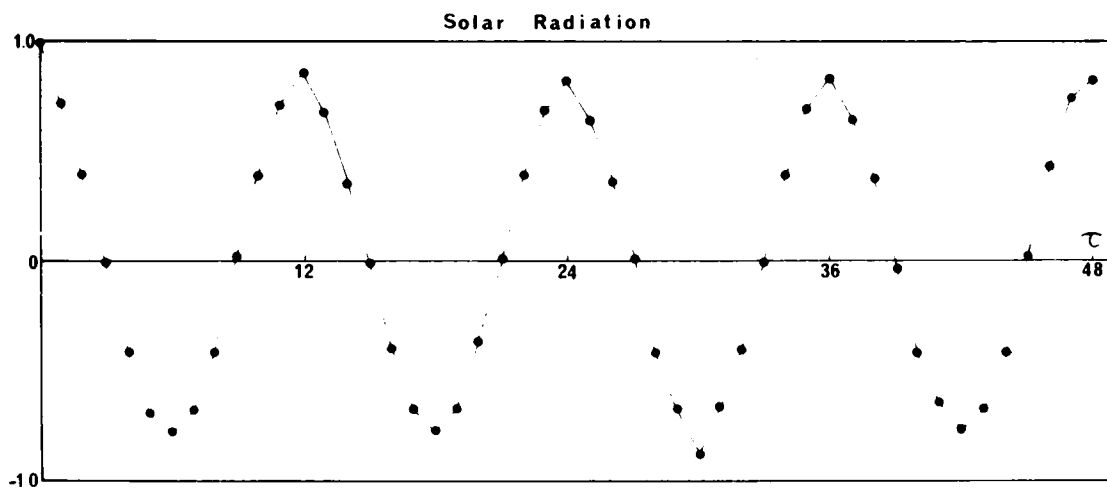


図5-27 日射量のコレログラム

分析の結果は図5-28および次式で示される。

$$\begin{aligned} \text{日射量 (cal/cm}^2\text{/day)} = & 296.98 + 90.44 \times \cos\left(\frac{\pi}{6}t - 1.081\right) + 12.17 \times \cos\left(\frac{\pi}{3}t - 5.720\right) \\ & + 9.43 \times \cos\left(\frac{\pi}{2}t - 0.421\right) + 12.32 \times \cos\left(\frac{2\pi}{3}t - 1.733\right) \end{aligned} \quad (5-93)$$

また、日照時間はその性質上、光合成速度に比例する形で表わされると考える。この場合も、神戸海洋気象台のデータより、昭和16年から昭和45年までの平年の平均値を用いて調和分析を行ない、次式で表わされる結果を得ている。

$$\begin{aligned} \text{日照時間 (hr/月)} = & 177.16 + 24.33 \times \cos\left(\frac{\pi}{6}t - 1.341\right) + 6.64 \times \cos\left(\frac{\pi}{3}t - 0.064\right) \\ & + 16.34 \times \cos\left(\frac{\pi}{2}t - 3.044\right) + 12.84 \times \cos\left(\frac{2\pi}{3}t - 6.147\right) \end{aligned} \quad (5-94)$$

いずれも、 t :時間(月単位)、 $t=0$ は4月としている。

(2) 水 温

水温は光合成速度および呼吸速度の両者に影響を及ぼす。水温と光合成速度との関係は、有賀²⁷⁾によれば光の十分な供給があれば図5-29(a),(b)に示すように、ある水温を最適温度とするピークのある曲線で表わされる。すなわち、低温では小さく、高温でも阻害がある。とくに、珪藻類についての曲線は正弦曲線で近似でき、 $\sin(4 \times \theta)$ で表わされる。ここで、 θ は水温である。

また、呼吸速度と水温の関係は、前出の図5-29の中の4つの場合のそれぞれの下に示されているように、 $0 \sim 30^\circ\text{C}$ の範囲では直線関係があり、 30°C 以上では下に凸のなだらかな曲線となることがわかる。一般に、本邦の貯水池の表面水温は高々 30 数度であり、この直線で示される範囲に入る。したがって、呼吸速度は $a \cdot \theta$ で表わされる。

(3) 栄 養 塩

栄養塩は植物プランクトンの増殖に対して制限因子として作用することが多い。これは自然水体中の窒素およびリンが生物の十分な増殖には足りないことが多く、制限的に働くためである。炭素化合物も不可欠なものであるが、一般に自然水中にはかなりの量が含まれていると考えられ、ケイ酸などについても同様である。ここでは、とくに窒素とリンのみを考えることにする。図5-30はRiley²⁷⁾による $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度と光合成速度あるいは成長速度との関係を示したものである。これより、その関係は一定の水温に対してMichaelis-Menten型の反応式で近似できることがわかる。²⁸⁾そのMichaelis-Menten定数はR. V. Thomannらの、窒素に対して $0.025 \text{ mg-Natm}/\ell$ 、リンに対して $0.005 \text{ mg-P atm}/\ell$ の値があるが、ここでは、実際の窒素やリンの濃度変化から窒素に対しては $0.1 \text{ mg}/\ell$ 、リンに対しては $0.02 \text{ mg}/\ell$ の値を用いた。

また、窒素の濃度の変化は第3章第4節の8年間のデータの時系列解析の結果を、リンについては

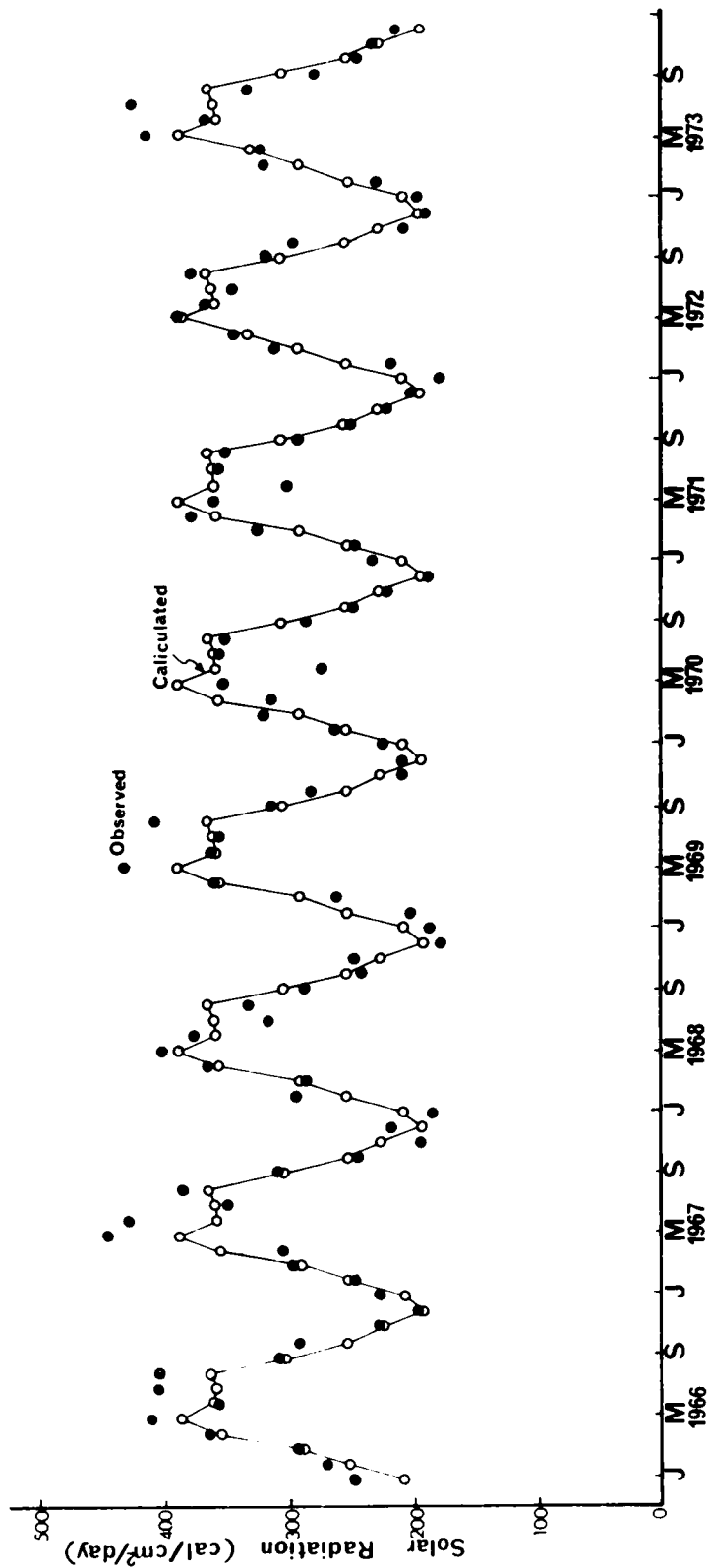


図5-28 日射量の調和分析結果

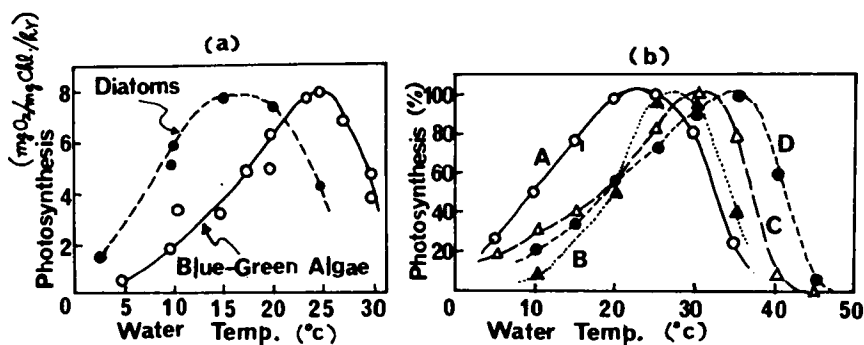


図5-29 光合成—温度曲線(市村, 有賀²¹⁾: A-Synedra sp., B-Anabaena cylindrica, C-Chloralla ellipsoidea, D-Scenedesmus sp.)

1年間のデータによる調和分析結果(第3章第4節)を用いる。

(4) 水 深

以上3項目のいずれもその水深方向の変化を加味する必要がある。まず、光量については、水中での光の減衰に関する Lambert-Beerの法則より次式で表わされる。⁷⁾

$$L_z = L_0 \exp(-\mu z) \quad (5-95)$$

ここで, L_z, L_0 : それぞれ水深 z m, 0 mの光の強さ。

μ : 減衰係数 (1/m)

z : 水深 (m)

μ は透明度 $Tr(m)$ の値を参考に $\mu = \frac{1.9}{Tr}$ の式²⁵⁾ などからも求めることができる。

つぎに、水温については、第5章第2節の水温の時系列解析の結果を対象地点について適用すればよい。さらに、栄養塩の窒素については、水深0, 1, 3, 5 mと測定データが不連続であるため、水深1 mの時系列解析の結果を代表として表層の全水深に適用する。また、リンについては、水深0~5 mの平均値について1年間の変化パターンが調和分析によって求まっているため、それを表層の全水深に用いる。

植物プランクトンの変化の基本式(5-91)は非定常2次元の偏微分方程式であり、その式の形および境界条件については植物プランクトンが浮遊性物質でもあるから、前述の第3節の浮遊性物質の場合と同様の取り扱いをして、式(5-92)のように差分式近似による数値解を求めることができる。したがって、その差分式も浮遊性物質の場合の式(5-54)において、反応項の $\kappa(1, m, n)$ に光合成や呼吸の項を代入すればよい。

ここで条件を整理すると、時系列解析結果から引用して

(a) 日射量および日照時間(第5章第5節より)

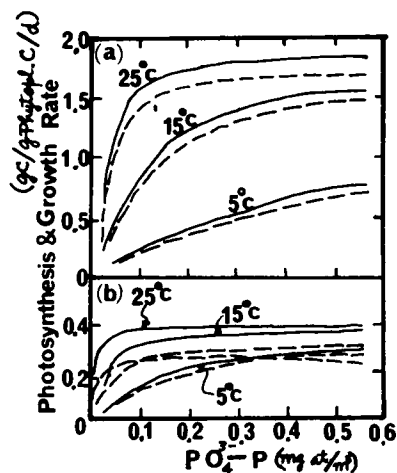


図5-30 植物プランクトンの光合成速度(実線)および成長速度(破線)と温度, 光, $PO_4^{3-}-P$ との関係²⁷⁾ (a) 0.25 cal/cm²/min, (b) 0.05 cal/cm²/min)

$$\text{日射量 (cal/cm}^2\text{/day)} = 297.0 + 90.4 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6} \cdot t - 1.081\right) + 12.2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3} \cdot t - 5.720\right)$$

$$94. \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot t - 0.421\right) + 12.3 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{3} \cdot t - 1.733\right)$$

$$\text{日照時間 } T_L \text{ (hr/月)} = 177.2 + 24.3 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6} \cdot t - 1.341\right) + 6.6 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3} \cdot t - 0.064\right)$$

$$+ 16.3 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot t - 3.044\right) + 12.2 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{3} \cdot t - 6.147\right)$$

Michaelis-Menten定数 $K_L = 60$ (cal/cm²/day) と, 消散係数 μ は 0.5 前後とする。

(b) 水温 (取水塔前の例) (第5章第2節より)

$$\text{水温 } T_z \text{ (}^\circ\text{C)} = (17.4 - 0.45 \cdot z) + (11.4 - 0.42 \cdot z) \cdot \cos\left\{\frac{\pi}{6} \cdot t - (1.89 + 0.03 \cdot z)\right\}$$

呼吸速度係数 r は 0.005 (1/day) 前後とする。

(c) 栄養塩 (取水塔前の例) (第3章第4節より)

$$\text{無機態窒素 } N_{om} \text{ (ppm)} = (0.165 + 0.000217 \cdot t) + (0.079 + 0.00083 \cdot t)$$

$$\cdot \left\{ 0.919 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6} \cdot t - 4.996\right) + 0.121 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3} \cdot t - 2.145\right) \right.$$

$$\left. + 0.212 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot t - 4.003\right) + 0.250 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{3} \cdot t - 5.064\right) \right\}$$

$$\text{リン酸イオン } P_{0 \sim 5m} \text{ (ppm)} = 0.033 + 0.020 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6} \cdot t - 1.295\right) + 0.024 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3} \cdot t - 2.919\right)$$

$$+ 0.012 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot t - 4.404\right) + 0.005 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{3} \cdot t - 5.407\right)$$

Michaelis-Menten 定数 $K_N = 0.1$ (ppm), $K_p = 0.02$ (ppm) をとる。ここで, t は月単位であり, N に関してのみ 1966 年 4 月を $t=0$ とするが, 他は全て $t=0$ を 4 月とする。

以上の条件を式(5-91)に代入した計算結果と膳棚地点のクロロフィル a および取水塔前地点の植物プランクトン濃度の観測値と比較したものが図 5-31 (a), (b) である。図 5-31 の観測値は昭和 49 年度の例である。計算結果は栄養塩流入量の多い 6~7 月に最大のピークを示し, 秋にも小さなピークが出現させている。観測値の最大のピークは 5 月であり, 計算値より 1.5 カ月早い, 秋のピーク時は一致している。計算値における 6~7 月の膳棚地点のクロロフィル a および取水塔前地点の植物プランクトン濃度のピークの大きさは, かなりの程度の植物プランクトンの異常発生をもこのシミュレーションモデルで説明し得ることを示している。また, 上記のシミュレーションは貯水池における藻類のほとんどが珪藻類であるため, 珪藻類を対象とした数値を使用しているため, 高水温時の抑制効果がきいて, 植物プランクトン濃度およびクロロフィル a の計算値は 8~9 月に低く観測値とよく一致している。こ

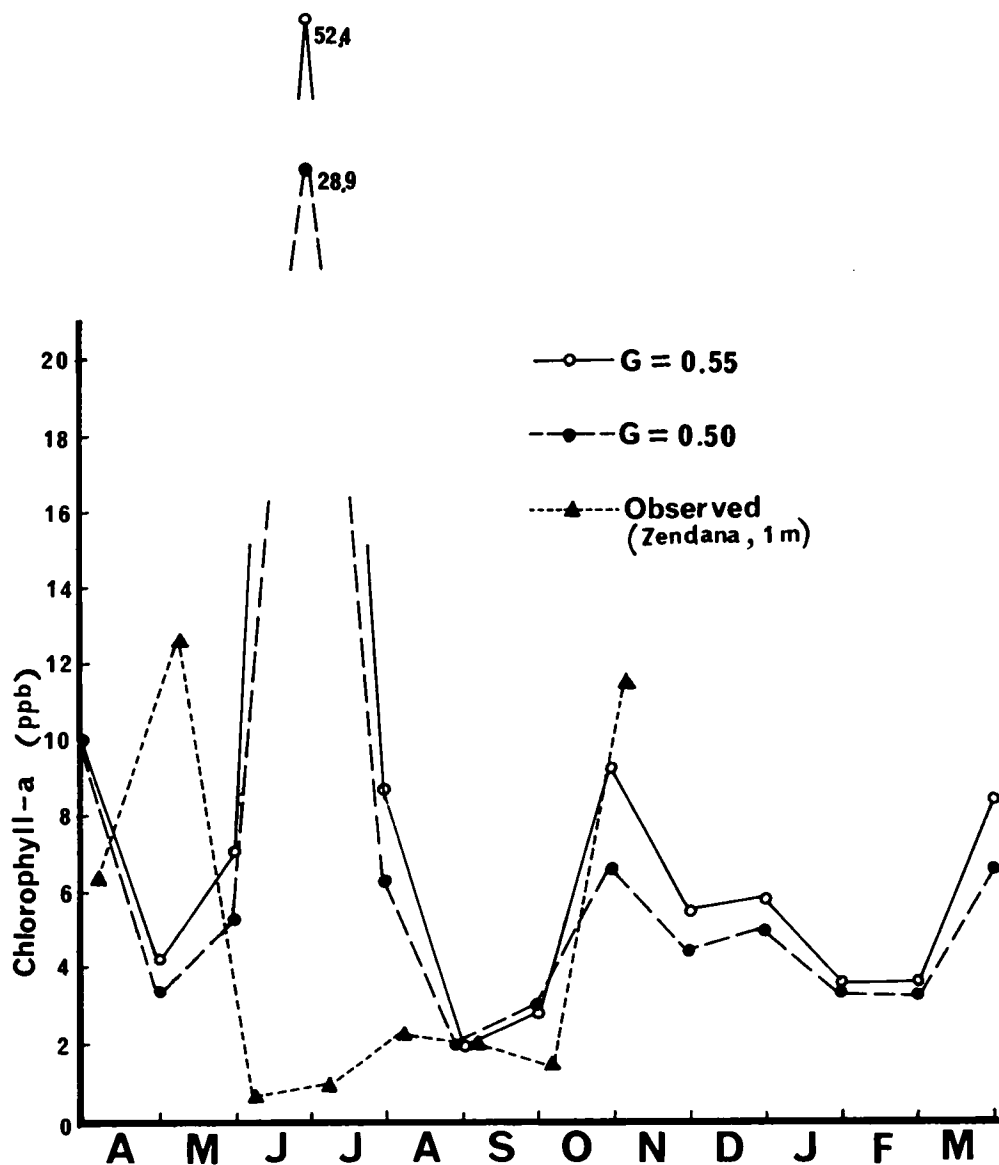


図5-31 (a)シミュレーション結果(膳棚, 1 m; 1974年度)

の植物プランクトン量の変化を大きく左右している総増殖速度(光合成速度から呼吸速度を減じたもの)の周年変化を水表面について示したものが図5-32である。図5-32より植物プランクトン現存量のピークに対する総増殖速度の大きさの影響は明らかであるが、総増殖速度の高い値の継続期間の影響も大きい。総増殖速度の変化パターンと、日射量および日照時間や、栄養塩としての無機態窒素およびリン酸イオン濃度の変化パターンとの比較、あるいは、それぞれの Michaelis-Menten 定数の異なる値に対する総増殖速度の変化から、総増殖速度に対する影響の程度は日射量条件で小さく、栄養塩条件で大きいことがわかる。また、総増殖速度の鉛直方向の変化は、水表面下より水深の増加とともに照度の減少を伴って小さくなり、負になることも多くなる。

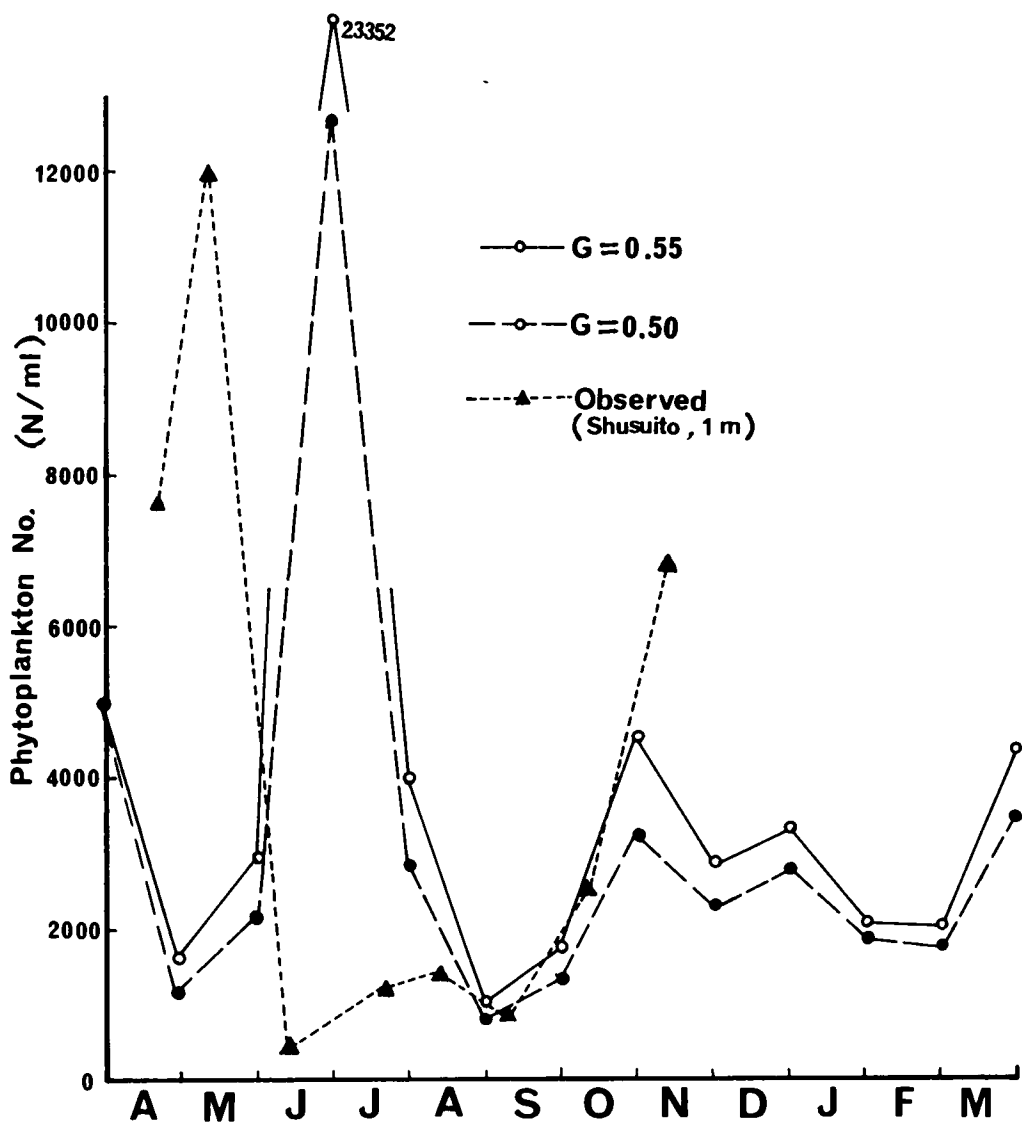


図 5 - 31 (b)シミュレーション結果 (取水塔前, 1 m ; 1974 年度)

さらに各係数や条件の精度を上げることにより観測値に近い結果を得るシミュレーションモデルとなり、将来の条件変化に対する予測など数値実験が可能となる。解析の結果として得られた栄養塩濃度の植物プランクトン量に対する影響度の大きさは、富栄養化の抑制のための栄養塩負荷の減少など水質管理への提言となる。

(Ⅰ) 植物プランクトンの増減と溶存酸素の変化

植物プランクトンの季節変化に対応し、その光合成および呼吸作用を通じて溶存酸素濃度も変化を繰り返すが、これには再曝気や他の生物の呼吸や分解作用、さらに水草による光合成作用、酸化還元反応による変化などが加わる。ここでは、植物プランクトンの両作用を中心に、再曝気と BOD 物質の分解作用を考慮したモデルを考える。このモデルにおいても、溶存酸素の物質収支式より、表水層につ

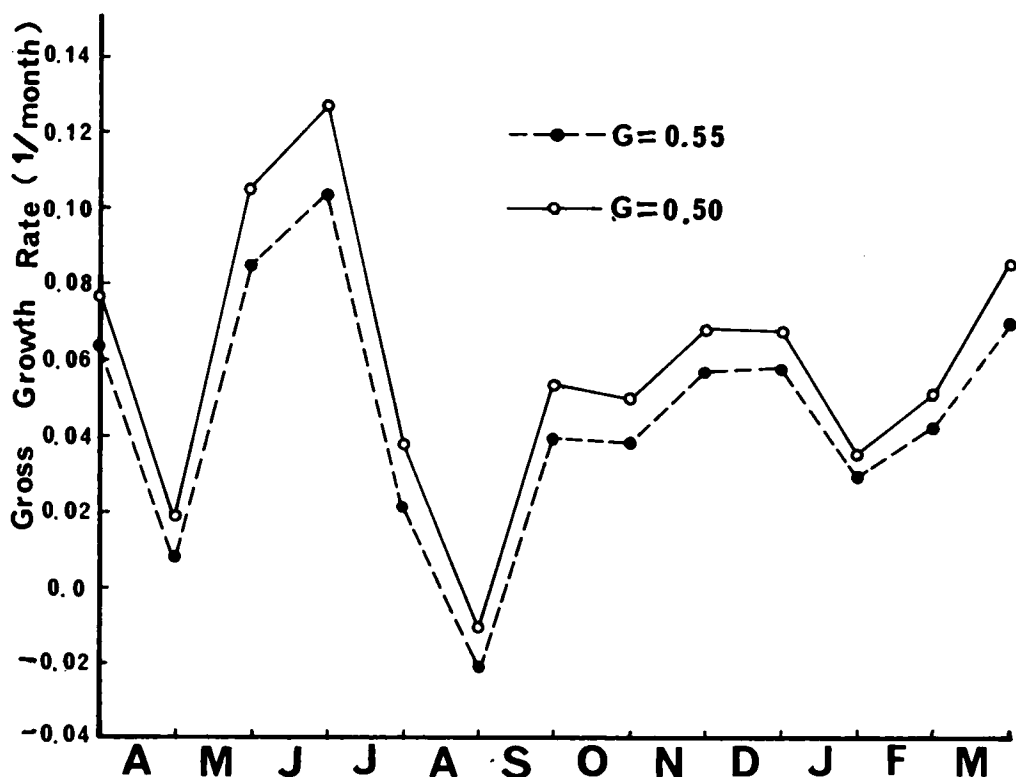


図5-32 総増殖速度の周年変化（取水塔前，1 m；1974年度）

いては，

$$\frac{\partial O}{\partial t} + u \frac{\partial O}{\partial x} + w \frac{\partial O}{\partial z} = E_x \frac{\partial^2 O}{\partial x^2} + E_z \frac{\partial^2 O}{\partial z^2} + \alpha \cdot (G - D) \cdot C - k_3 \cdot L \quad (5-96)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{水表面 (} z=0 \text{) において,} & \frac{\partial O}{\partial z} = k_2 (O_s - O) \\ \text{第1内部境界面 (} z=h_1 \text{) において,} & \frac{\partial^2 O}{\partial z^2} = 0 \\ \text{起点 (} x=0 \text{) において,} & O = O_0(z) \\ \text{初期 (} t=0 \text{) において,} & O = \text{const.} \end{array} \right.$$

この式(5-96)においては，移流項，光合成および呼吸項，分解項の変化が全体を左右するが，右辺の最後の分解項は BOD が小さければ無視できる。

ここで溶存酸素濃度 O_s の水温 (θ) に対する近似式³¹⁾ および BOD の変化式（取水塔前）はつぎのようになる。

$$O_s \text{ (ppm)} = 14.652 - 4.102 \times 10^{-7} \cdot \theta + 7.9971 \times 10^{-3} \cdot \theta^2 + 7.774 \times 10^{-4} \cdot \theta^3$$

$$\text{BOD 濃度 } L(\text{ppm}) = 1.38 + 0.845 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6} \cdot t - 0.731\right) + 0.066 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3} \cdot t - 0.549\right)$$

$$+ 0.297 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot t - 0.101\right) + 0.499 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{3} \cdot t - 1.015\right)$$

(第5章第5節)

ここでは、 t は月単位であり、 $t=0$ を4月としている。図5-31の値に従って計算された溶存酸素の変化の例を図5-33に水深0mの表水層について示す。春から夏までの変化は観測値とかなりよく一致するが、秋から冬までの期間は、植物プランクトン数の観測値との一致の程度も落ちるため、その適合度は低下する。この溶存酸素量のように植物プランクトンの生産と呼吸の影響が大きいものは、植物プランクトンの現存量だけでなく、光合成活性のような生物の活性度にも大きく左右される。一般に、光合成活性は春季の方が秋季よりも大きいことが多く、一年間同じ活性度で計算したものは秋季に大きくなりすぎる傾向がある。

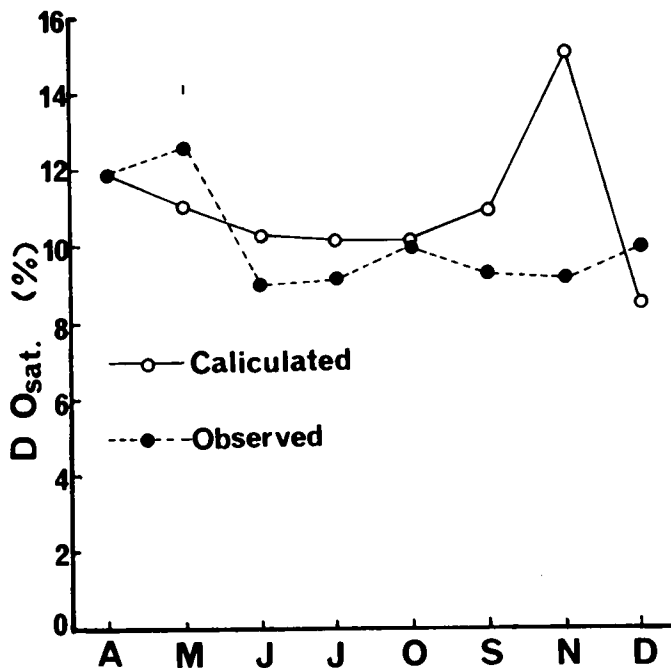


図5-33 溶存酸素濃度の季節変化(膳棚, 0m; 1974年)

(II) 簡略化式による感度解析

前述までの例では、植物プランクトンの動物プランクトンの捕食による減少が無視できる場合であるが、動物プランクトンによる影響を考慮すると以下ようになる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + w_p \frac{\partial C}{\partial z} = E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + E_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - R \cdot C - g_z \cdot Z \cdot C \quad (5-97)$$

ここで、 $\left\{ \begin{array}{l} R = G - D \\ G: \text{植物プランクトンの増殖速度} \end{array} \right.$

$\left\{ \begin{array}{l} D: \text{植物プランクトンの呼吸速度} \\ Z: \text{動物プランクトン濃度} \\ g_2: \text{捕食係数} \end{array} \right.$

さらに、増殖、呼吸、および捕食の関係をもう少し詳しく見るために、簡略化された非定常の反応速度式による検討を行なってみる。このモデルでは、考えている水塊中だけの変化を考えており、移流・対流・拡散などによる input と output が等しく、かつ変化のない場合である。このモデルによる解析は、Lotka-Volterra²⁹⁾の式、さらにプランクトンの密度効果および飽食効果を考慮した篠崎の式³⁰⁾、捕食のメカニズムをとり入れた Ivlev³⁰⁾、Holling の式³⁰⁾がある。これらは、Royama³⁰⁾によってつぎの形に整理されている。

$$\left. \begin{array}{l} \frac{dC}{dt} = g_1(C) - f(C) \cdot Z \\ \frac{dZ}{dt} = g_2(C, Z) \end{array} \right\} \quad (5-98)$$

各モデル式の g_1 , f , g_2 について示したものが表 5-8 であり、 X は植物プランクトンの最大濃度、 K は飽食効果を示す係数、 h_g は 1 つの餌の捕食と消化の後、つぎの餌を捕食するまでの時間を表す。

表 5-8

モデル名	g_1	f	g_2
Lotka-Volterra	$C_0 \cdot C$	$a \cdot C$	$-b \cdot Z + e \cdot C \cdot Z$
Gause	logistic	——	$C_0(1 - e^{-aC})Z$
Nicholson	——	$a \cdot C$	——
Pielou	$a_1 \cdot C$	——	$Z(a_2 - c_2 \frac{Z}{C})$
Holling	——	$\frac{a \cdot C}{1 + a \cdot h_g \cdot C}$	——
Ivlev	——	$b(1 - e^{-aC})$	——
Royama	——	$\frac{a(C) \cdot C}{1 + a(C) \cdot h_g \cdot C}$	——
島 津	$(1 - \frac{C}{X}) \cdot C$	$\frac{a \cdot C}{1 + a \cdot h_g \cdot c}$	$Z \cdot (1 - \frac{Z}{K \cdot C})$

これらのモデルを検討し、植物プランクトンの密度効果、動物プランクトンによる捕食、および植物プランクトン自体の死滅および沈降を考慮した修正式として、次式(5-99)を考える。

$$\frac{dC}{dt} = G \cdot \left(1 - \frac{C}{X}\right) \cdot C - g_z \cdot C \cdot Z - (D + S) \cdot C \quad (5-99)$$

ここで、 $\begin{cases} g_z: \text{捕食係数} \\ D: \text{呼吸速度} \\ S: \text{沈降による除去係数} \end{cases}$

また、動物プランクトンの変化を表わす式は、

$$\frac{dZ}{dt} = G_z \cdot Z \cdot \left(1 - \frac{Z}{K \cdot C}\right) - D_z \cdot C \quad (5-100)$$

ここで、 $\begin{cases} G_z: \text{動物プランクトンの増殖係数} \\ D_z: \text{動物プランクトンの死滅係数} \end{cases}$

さらに、溶存酸素量の植物プランクトン変化に伴う増減を表わす関係式として、再曝気の項も考慮して次式(5-101)となる。

$$\frac{dO}{dt} = \alpha \left[G \cdot \left(1 - \frac{C}{X}\right) \cdot C - D \cdot C \right] + k_2 (C_s - C) \quad (5-101)$$

ここで、 $\begin{cases} \alpha: \text{植物プランクトン量変化の酸素量増加への変換係数} \\ k_2: \text{再曝気係数で、} k_2 = k_{20}^{\circ\text{C}} \cdot (1.046)^{\theta-20} \\ C_s: \text{その時点の水温に対する飽和溶存酸素濃度} \end{cases}$

この式では、千苺貯水池の観測結果によれば、BODおよび動物プランクトン数が非常に少いので、その分解や呼吸による影響は考慮していない。

これらのうちで、植物プランクトンおよび溶存酸素については、千苺貯水池での1カ月毎の観測結果があるゆえ、そのモデルの計算結果の適合を検討してみる。

まず、増殖係数については、すでに非定常2次元モデルで考慮した水温、日射量、窒素およびリンを制限因子として取り入れ、死滅あるいは呼吸係数は水温に比例すると考える。水温、日射量、窒素、リンの変化には、乱流拡散式による取り扱いと同様に第3章の調和分析結果を関数形のまま導入し、この常微分方程式の解法としてRunge-Kutta法を用いている。また、溶存酸素の変化においては、溶存酸素飽和濃度の水温による変化の近似式も(1)の解析の場合と同じ式を用いる。こういった固定の条件に対して、各定数の変化に対する植物プランクトンおよび溶存酸素濃度の応答を計算した結果の代表例を図5-34～図5-36に示す。なお計算のステップには半月を採用している。

これらの多くの計算結果の検討を要約すると以下ようになる。

- (1) 窒素およびリンの濃度変化が、日射量の変化よりもその制限因子として大きな影響を示す。したがって、水質管理は流入河川への栄養塩負荷の抑制など貯水池上流河川を含めた総合管理のためのシステム・シミュレーションも必要となる。
- (2) 植物プランクトン自体の密度定数の大きさ(X)は、このモデルの精度への影響が大きいので、培養実験などによって栄養塩の充足度との関係をさらに精度良く知ることが必要である。
- (3) 栄養塩および植物プランクトン量変化の相互の関係を、原因と結果の対応として把えて、栄養塩の

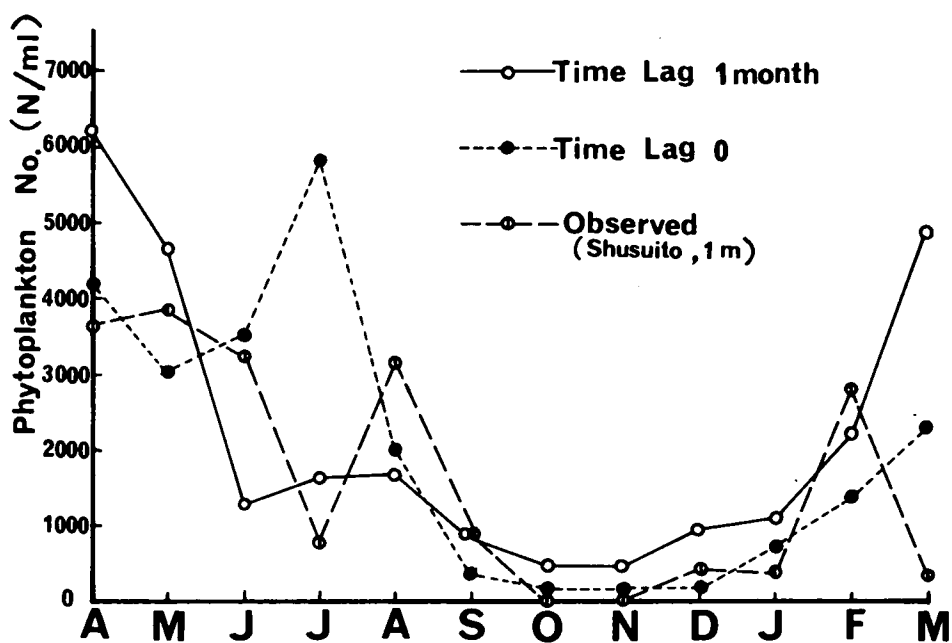


図 5 - 34 (a)シミュレーションによる植物プランクトン濃度の周年変化
(栄養塩の位相のずれによる変化)(取水塔前, 1 m; 1971 年度)

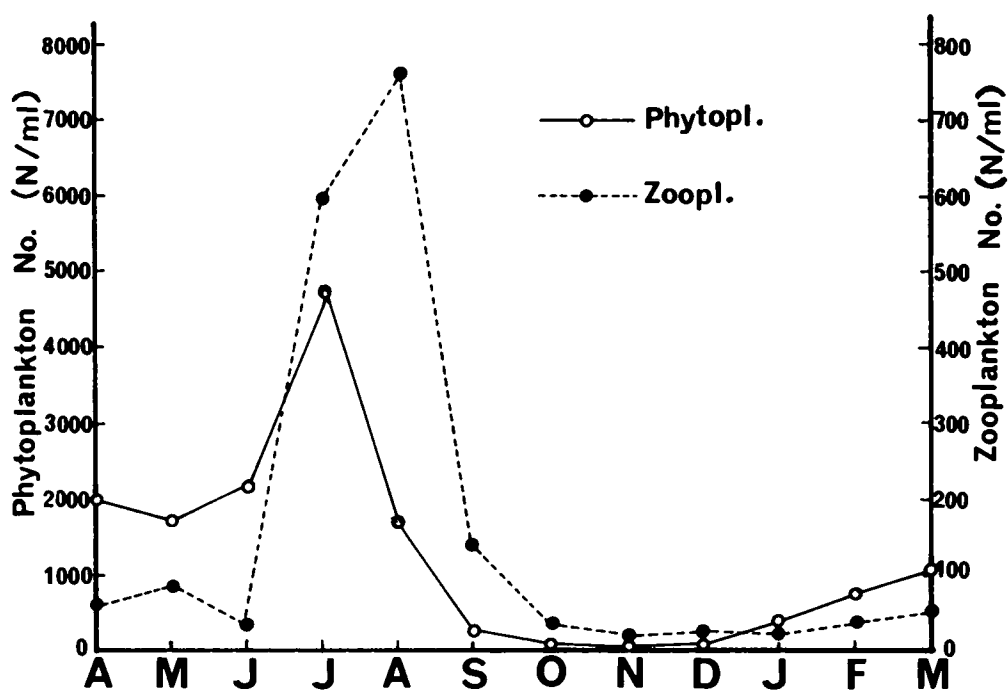


図 5 - 34 (b)シミュレーションによる植物および動物プランクトン濃度の周年変化
(捕食効果のある場合)(取水塔前, 1 m; 1971 年度)

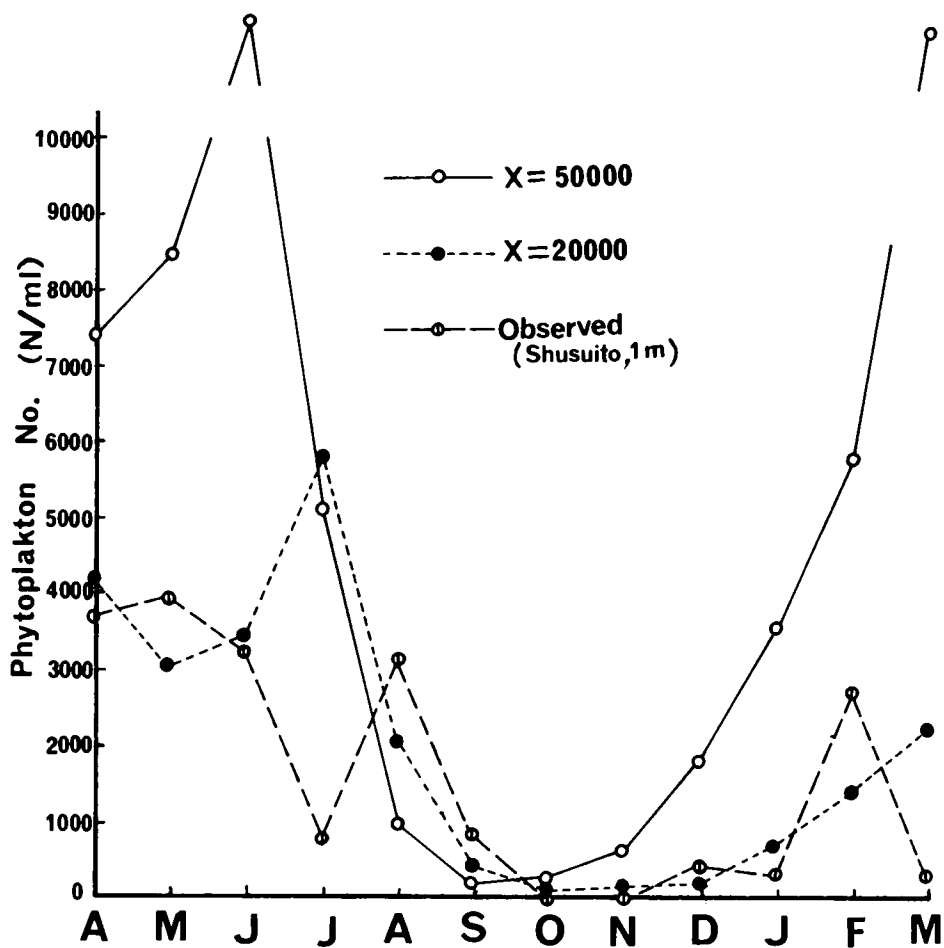


図 5 - 35 (a)シミュレーションによる植物プランクトン濃度の周年変化
(X の値を変化させた場合) (取水塔前, 1 m ; 1971 年度)

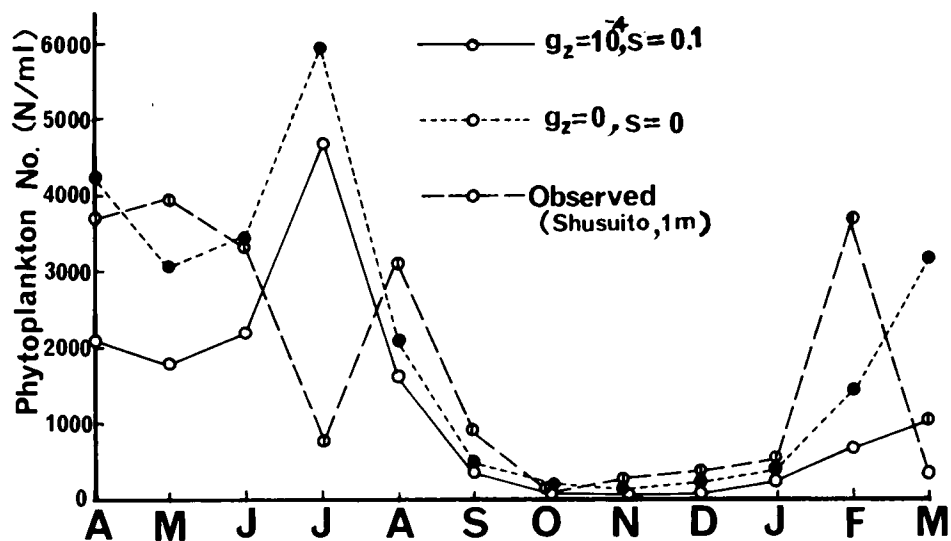


図 5 - 35 (b)シミュレーションによる植物プランクトン濃度の周年変化
(捕食・沈殿効果の有無の場合) (取水塔前, 1 m ; 1971 年度)

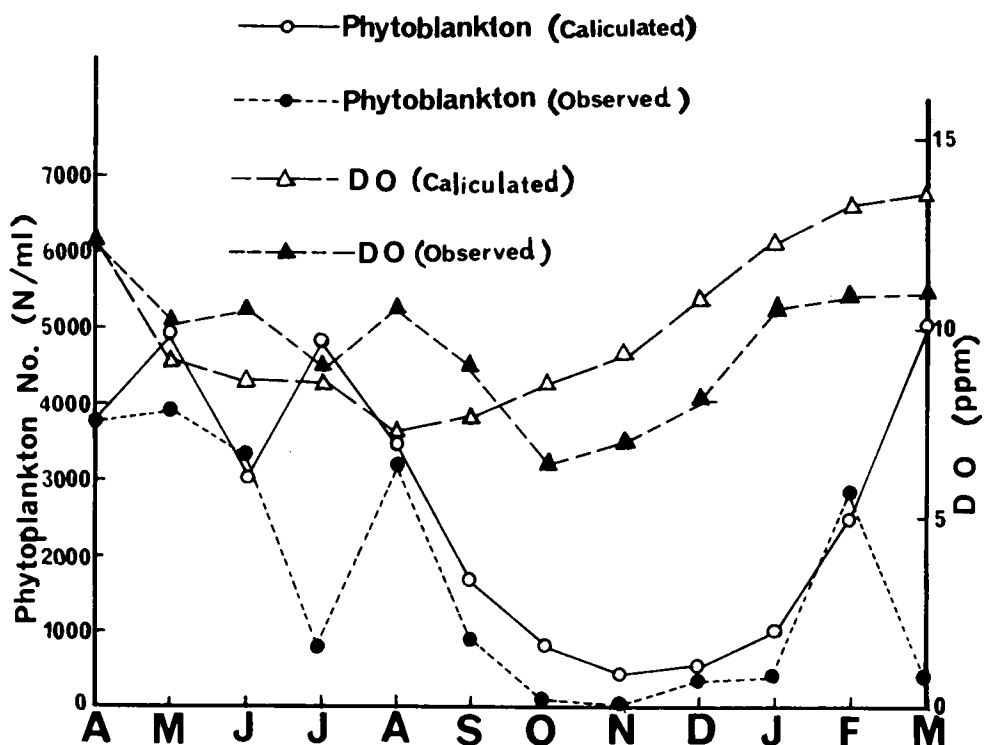


図 5-36 (a) シミュレーションによる植物プランクトンおよび DO 濃度の周年変化 (捕食効果のない場合) (取水塔前, 1 m; 1971 年度)

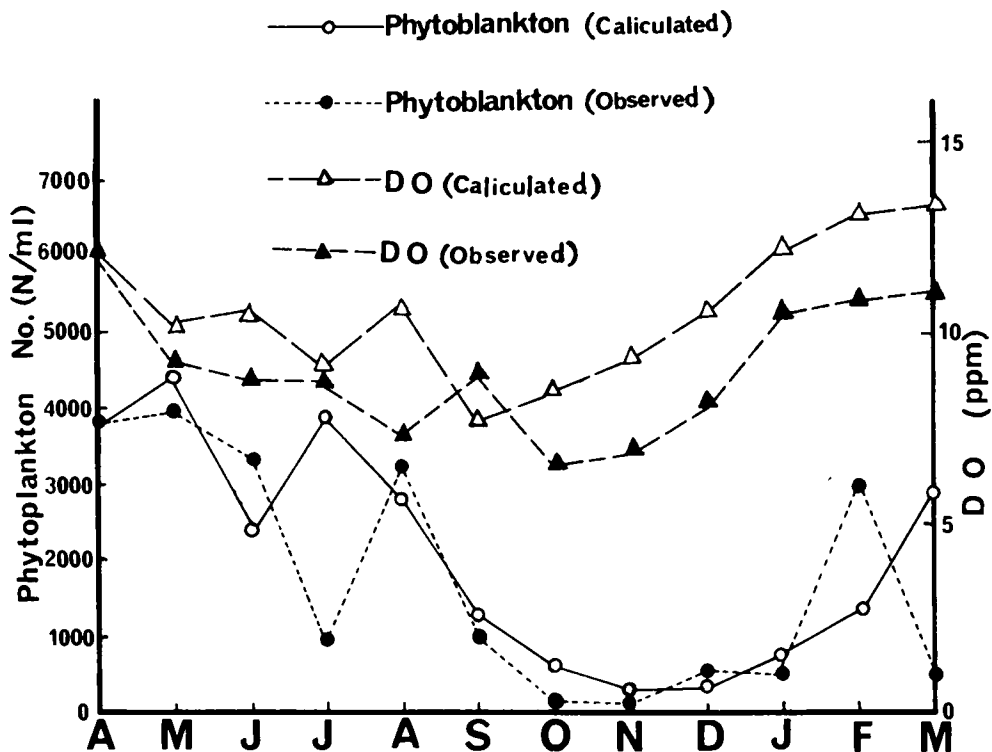


図 5-36 (b) シミュレーションによる植物プランクトンおよび DO 濃度の周年変化 (捕食・沈殿効果のある場合) (取水塔前, 1 m; 1971 年度)

窒素とリンの濃度変化の位相を半月あるいは1カ月進ませる方が、植物プランクトン観測値の消長パターンをより良く説明できることがわかった。

- (4) 沈降および捕食の影響は、その式の形からもわかるように植物プランクトン濃度が全体的な増減に関係するだけで、消長パターンを根本的に変えるものではない。
- (5) 植物プランクトン数の観測値と、モデルによる計算値との比較では、全体的な消長パターンと、それぞれの平均値や標準偏差など統計量による検討から、かなりの適合性が見られるが、昭和45年の植物プランクトン異常発生(bloom)のような現象は、このモデルではうまく説明できない。
- (6) 溶存酸素濃度の変化は、計算値が1年を通して滑らかで平均的な変化を示し、各月間に凸凹を伴う観測値の変化とは少し異なるパターンとなる。これは、植物プランクトンの消長パターンの精度の向上によって、観測値に近づく結果が得られると考えられる。
- (7) さらにシミュレーションモデルの精度向上のために修正や改善を加えて、数値実験としての将来予測の信頼性を高める必要があり、捕食者としての動物プランクトンや有機物の無機化による栄養塩の回帰を担う細菌の作用を明確化しなければならない。
- (8) 植物プランクトンや動物プランクトン量が有機態窒素、有機態リンおよび有機態炭素などの形で窒素やリンおよび炭素サイクルの中で扱えられるならば、細菌の作用も加味した窒素やリンおよび炭素の形態変化の式としてもっと詳しく解析することができる。
- (9) このような生物量と水質変化に対するシミュレーション解析は、生物量の変化だけでなく、その現存量と生物活性の結果としての生産量(例えば溶存酸素、pH、アルカリ度など)との関連でもチェックできる。したがって、この特徴を生かした解析が水質管理に役立つことになる。

第6節 結 語

この章では、水温変化は熱移動、浮遊性物質や溶解性物質の濃度変化は物質移動として、移動現象論による取り扱いを中心に、一部第3章の統計解析を加えて、理論解析を行なった。さらに、水質変化と生物量の相関として、植物プランクトンの増減の数学モデル化を行なっている。これらの解析は一貫して、水温の鉛直分布あるいは温度成層状態によって分類される温度躍層による層分割方式に基いた解析モデルに従っている。

まず、水温変化の解析では、流下方向および水深方向についての調和分析による1年周期の関数による全般的な変化の把握を行なっている。すなわち、1年周期の余弦関数の平均値、振幅、位相角の変化の定式化による水温変化の解析である。さらに、個々の安定した流動状態下における水温解析としては、熱収支に基く偏微分方程式による数値解、あるいは、単純化された方程式による解析解を得ており、模型実験結果との比較検討も加えている。

つぎの浮遊性物質の解析では、温度成層状態下における濁質の挙動について温度躍層面での境界条件に浮遊性物質再浮上のパラメータ k の拡大適用を行ない、物質収支式に基いた偏微分方程式の数値解および簡略化される場合の解析解を得た。その反応項には1次反応式を考慮し、その有無によって解析が分けられる。この場合も模型実験結果との比較検討によって、その挙動を説明しうる結果を得た。

つぎに、溶解性物質の解析については、成層状態下における温度躍層面での混合過程に注目し、物質収支に基いた偏微分方程式による解析で、その境界条件が flux で規定される場合の解析を行なった。この溶解性物質は、その水表面での再曝気現象の有無などから、溶存ガスは別扱いとしている。とくに、炭酸ガスは pH、アルカリ度、水温によって決定されるので、その関係式により実測が困難な CO₂ 変化のパターンの推定ができた。

さらに、最後の水質変化と生態系の相関では、植物プランクトンを有機性の浮遊性物質とする基本式と境界条件により、環境条件として日射量と日照時間、栄養条件として窒素およびリンの影響を増殖係数に導入して数値解析を行なっている。この手法は、千叡貯水池での観測結果との比較検討に応用したところ、植物プランクトン量の変化パターンの説明ができた。また、その結果としての溶存酸素の増減の数値解法を示した。

貯水池における成層状態および水質変化を左右する水温変化を把握した上、浮遊性物質や溶解性物質の挙動を知ることは、選択取水など水利用面での利点となる。さらに、貯水池内の栄養塩濃度など外的環境条件の変化に対する植物プランクトン量の消長をシミュレーションモデルによって解析し、栄養塩濃度の植物プランクトン量に対する影響度の大きさを指摘できた。したがって、これらの成果は、ダム貯水池の富栄養化抑制のために貯水池内だけでなく流入河川など上流域も含めた栄養塩や有機汚濁物質の負荷の減少などの対策および監視の必要性を示唆しており、シミュレーション解析の水質管理への応用の道を開くことになる。

参 考 文 献

- 1) J. A. Dutton and R. A. Bryson: "Heat Flux in Lake Mendota" Limnol. & Oceanog. Vol.7, No.1, pp.80~97 (1962)
- 2) C. J. Velz and J. J. Gannon: "Forecasting Heat Loss in Pond and Stream" Jour. of W.P.C.F. Vol.32, No.4, pp.392~417 (1960)
- 3) J. M. Raphael: "Prediction of Temperature in Rivers and Reservoirs." Proc. of A.S.C.E., Vol.88, No. PO2, pp.157~181, (1962)
- 4) W. H. Delay and J. Seaders: "Predicting Temperature in Rivers and Reservoirs." Proc. of A.S.C.E., Vol.92, No. SA1, pp.115~133 (1966)
- 5) 和田 明: 「火力・原子的発電所の冷却水放出による熱拡散機構の理論的検討」電力中央研究所 技術研究所報告 No 67072 (1967)
- 6) 林泰造・道藤伸夫・川上克己: 「火力発電所よりの放出冷却水の湾内拡散について」第13回海岸工学講演会講演集(土木学会)(1966)
- 7) 安芸皎一・多田文雄監修: 「水資源ハンドブック」 pp. 71 ~ 122, 朝倉書店 (1966)
- 8) 合田健・海老瀬潜一: 「水質の変化とその予報に関する研究(2) — 貯水池の水温変化予知への拡散モデルの適用と相似則 —」第6回衛生工学研究討論会(土木学会)講演論文集, pp. 130 ~ 139, (1970)
- 9) 山口柏樹: 「河口湖における拡散現象の総合報告(その1)」工業用水, No 113, pp. 12 ~ 28, (1968)

- 10) R. V. Churchill (洪四方次訳) : 「応用ラプラス交換」 (新版) 彰国社 (1950)
- 11) H. S. Carslow and J. C. Jaegar : “Conduction of Heat in Solids” 2nd. ed. Oxford (1959)
- 12) J. C. Crank : “The Mathematics of Diffusion” Oxford (1959)
- 13) T, Takemura : “A Model Experiment Referring to the Cause of the Formation of the Turbid Layer in the Lake.” Jour. of the Fac. of Lib. Arts and Sci., Shinshu Univ. No.5, (1959)
- 14) 合田健・海老瀬潜一 : 「水質の変化とその予報に関する研究(4) — 成層流における水質変化について —」第9回衛生工学研究討論会(土木学会)講演論文集, pp. 208 ~ 215, (1973)
- 15) 合田 健 : 「上水浄化における水理学上の基礎的諸問題」京都大学学位論文(1956)
- 16) 川下研介 : 「熱伝導論」オーム社書店 (1966)
- 17) 小泉睦男 : 「移動・速度論」昭晃堂 (1968)
- 18) Hays and Beckett : “The Flows of Minerals through the Thermocline of a Lake” Arch. für Hydrobiol. Vol.51, No.3, (1956)
- 19) 合田健・海老瀬潜一 : 「貯水池の流動と水質との関係について」第18回水理講演会(土木学会), 講演集, pp. 193 ~ 198, (1974)
- 20) J. O. Blanton : “Vertical Entrainment into the Epilimnia of Stratified Lake.” Limnol and Oceanogr. Vol.18, No.5, pp.697~704 (1973)
- 21) 日本水道協会 : 「上水試験方法」1970年版 pp. 149 ~ 151, 日本水道協会, (1971)
- 22) R. M. Emery, C. E. Moon, and E. B. Welch : “Enriching Effects of Urban Runoff on the Production of Mesotrophic Lake” Water Research Vol.7, No.9, pp.1505~1516 (1973)
- 23) 農林省農蚕園芸局肥料機械課 : 「最近の肥料事情」(1974)
- 24) 農林省農蚕園芸局肥料機械課監修 : 「ポケット肥料便覧」— 1975 — 農林統計協会 (1974)
- 25) 京都府 : 「昭和49肥料年度における月別入荷見込数量」京都府 (1974)
- 26) 井上頼輝 : 「水質汚濁の機構と富栄養化のモデルについて」第9回水質汚濁に関するシンポジウム (日本水質汚濁研究会) 講演集, pp. 37 ~ 62, (1975)
- 27) 有賀祐勝 : 「水界植物群落の物質生産Ⅱ — 植物プランクトン」(生態学講座 8) 共立出版 (1973)
- 28) T. R. Parsons and M., Takahashi(市村俊英訳):「Biological Oceanographic Process (生物海洋学)」三省堂 (1974)
- 29) R. V. Thomann, M. Ditro and D. J. O’Conner : “Preliminary Model of Potmac Estuary Phyto-plankton” Jour. of A.S.C.E. Vol.99, No.SA3, pp.699~715 (1974)
- 30) Chen-Nan Lin : “Simulation of Water Quality Enhancement in a Polluted Lake” Washington State Univ. Ph. D. thesis (1972)
- 31) 島津康男・岸保勘三郎・高野建三 : 「自然の数理」(数理科学シリーズ ②) pp. 215 ~ 225, 筑摩

書房 (1975)

32) 島津康男：「システム生態学」(生態学講座 36) 共立出版 (1973)

33) 大島高志：「貯水池の水質変化についての基礎的研究」京都大学修士論文, pp. 71 ~ 72, (1975)

第6章 貯水池水質管理の基礎的考察

第1節 概 説

一般に、貯水池においてはその設置目的あるいは用途に従って管理がなされるが、その場合、とくにその水量および水質の両面が条件として要求される。この両者はいずれもその流域特性によって左右されるが、貯水池が多目的ダムのような場合は、洪水調節と水利用の間での利害が衝突することが多く¹⁾、従来はそのダム構造自体からの要求により水質的な面での要求が抑えられたりした。また、濁水や水質汚濁の深刻さが少なかったので水質管理の重要さの認識が十分でなかったり、水質管理の研究も遅れている面があった。用水供給のウエイトの増加と水質汚濁の深刻化を考慮すると、貯留水の水質変化および貯水池水体としての環境の面から、現在あるいは将来に建設予定のダム貯水池の目的や用途を満足させるための指針や手がかりを与える水質管理の研究は重要である。

従来からの貯水池の水質問題としては、貯水池に放流あるいは取水される水の冷水および濁水問題が主であったが、現在では、貯留水の富栄養化を含めた水質汚濁の問題が加わり、貯留水の水利用だけでなく、環境としての貯水池水域の水質保全の問題として考えられるに至っており、最近は景観としての問題も取り扱われている。

第2節 従来からの問題

2-1 水 温 問 題

貯水池の水体は、主として太陽のエネルギーを受けて春から秋にかけてその大きな比熱によって表面に近い水塊をかなり高い水温に維持している。しかし一方では、水深が大きくて底面に近い水塊は、冬季でも上部との混合がないまま低温が維持される。したがって、貯水池を black box とすると、流入水の input に対して output の流出水の応答が流入水より低い値になる²⁾ことも起こりうる。その平均的な状態について模式的に示したものが図6-1(a)であり、 θ_w と θ_w' の差は主として取水口あるいは放流口の水深と水温の鉛直分布によって決定される。また、図6-1(b)は、取水あるいは放流される水温の大きさと位相のズレを示したものである。ダム貯水池築造前、すなわち、ダム流入水温が比熱の大きい貯留水体を通して放流されるために、水温の位相が春先は冷たく、秋口は温くなるようにズレることになる。また、貯水池内の密度分布によって放流される水塊の違いを模式的に示したものが図6-2である³⁾。

このように、貯水池の放流水温あるいは取水水温が放流あるいは取水位置と水温の鉛直分布によって支配されるゆえ、水温問題には適当な取水位置による選択取水あるいは放流が必要である⁴⁾。そして貯水池には水位変動がつきものであるから、鉛直方向に多くの取水口を設けねばならない。既設のダム貯水池では、その構造上の問題や多目的水利用のため、取水口あるいは放流口の数はいくつか、位置は限定されている。しかし、水質的な利用面を考えれば、後の濁水問題などの配慮も加えて、取水口の数をもやす必要がある。とくに、多目的ダムのように競合する水利用に対して、その配慮は不可避のものとなる。

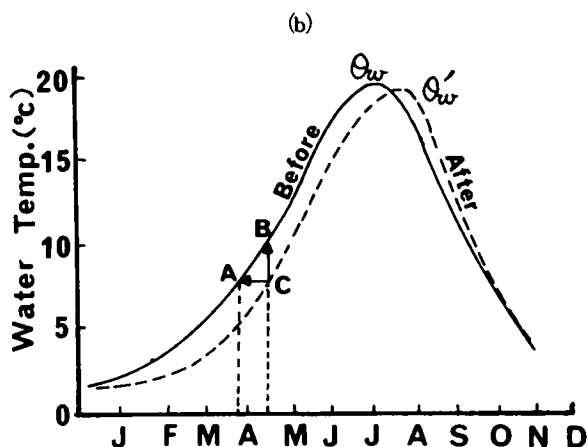
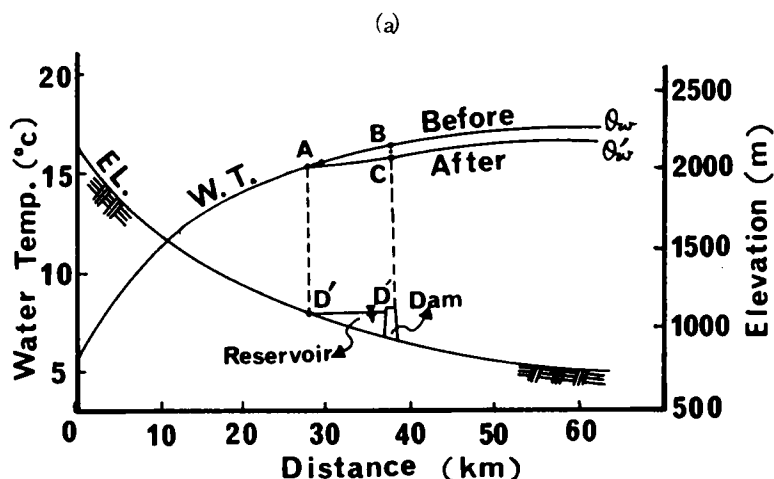


図 6-1 ダム貯水池築造に伴う水温変化

一般に、かんがい用水としては稲作には高温水が良く、下流河川水としては水生生物に対しては、ダム築造前後でその水温差が大きくならぬようにすることが今後のダム建設には必要であろう。

2-2 濁水問題

貯水池は、降水の一時的な流出を貯え、常時平均的な水量を確保する流量調整の役割を有しており、必然的に高水時の高濁水を貯留する宿命にある。そして、ダム貯水池が存在しない旧河道の状態であれば、高水時の濁度は流量の減少とともに短期間に減衰して行くのが本邦河川の流出特性である。しかし、ダム貯水池の設置とともに高水時の濁質が貯水池内に高濁度水としてとどまり、図 6-3 のように少しずつ流出して行くため、下流および貯水池ともその水利用の上で問題となる⁵⁾。2-1 の冷水問題の場合と同様に貯水池を black box とすると、高濁度水の一時的な input に対する流出水の output の応答が遅れた形、すなわち、かなりの時間遅れを有した形で長く高濃度で持続して流出することが問題となる。したがって、貯水池内の流動状態に対応する流入濁質の滞留時間分布の問題として捉えることができる。すなわち、第 3 章第 2 節の流動調査の項で述べた濁質をトレーサーと見なした流動解析の問題として取り扱えるが、濁

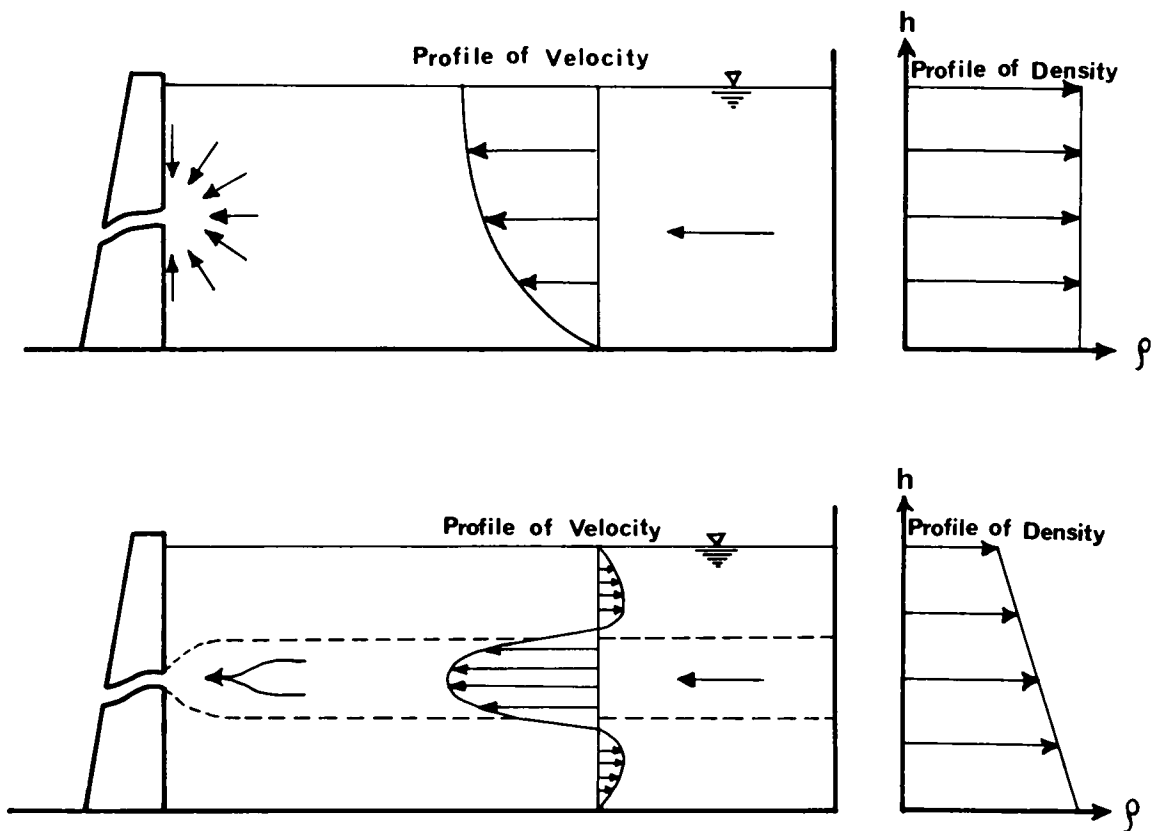


図 6 - 2 取水・放流の位置の影響

質が沈降速度を有していることがそのトレーサーとしての最大の特色である。それゆえ、これを成層状態を含めた混合状態の解析として dead zone (死水域) と main flow (主流域) との物質移動問題とも見ることができる。

第 3 章第 2 節の流動調査の項では、その濁度のピークの到達時間から主流域 (main flow) の流速の推定を行なったが、ここでは、ピークの後の高濁度の減衰の長期化が問題になる。したがって、ここでは、第 2 章第 2 節に示した図 2 - 6, 7, 8 の output としての取水濁度変化のほか、貯水池内の滞留状態の図 6 - 4, 図 6 - 5, さらにその前後の 5 回の濁度調査の結果をまとめて図 6 - 6 (a)(b)(c)(d)(e) に示すと、この現象の把握に役立つと考えられる。取水あるいは放流水の濁度の時間変化および貯水池内の濁質の分布状態から、貯留水の成層状態が支配的因子として働くので、温度躍層付近の水を高水時に速やかに放流して、池内の滞

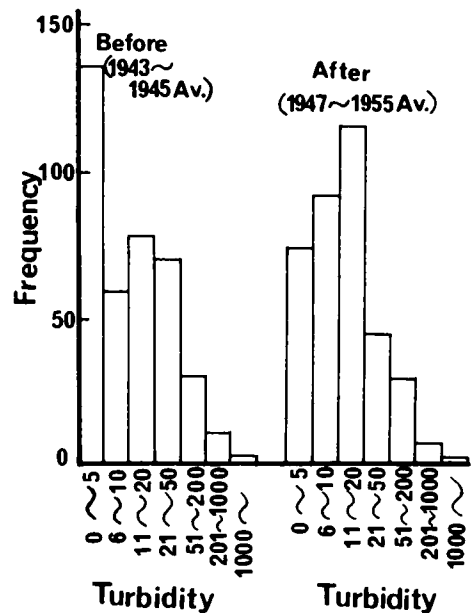


図 6 - 3 相模ダム貯水池出現によるダム下流の濁度変化 (半谷⁵⁾)

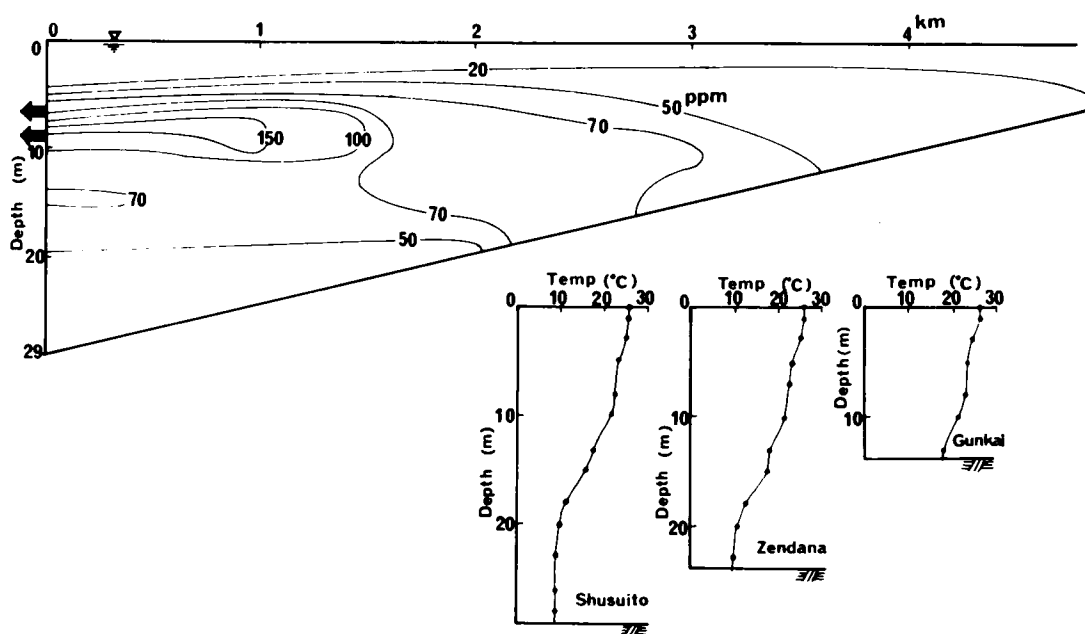


図 6 - 4 成層期の貯水池内濁度分布 (千苺貯水池 ; 1972 年 9 月 12 日)

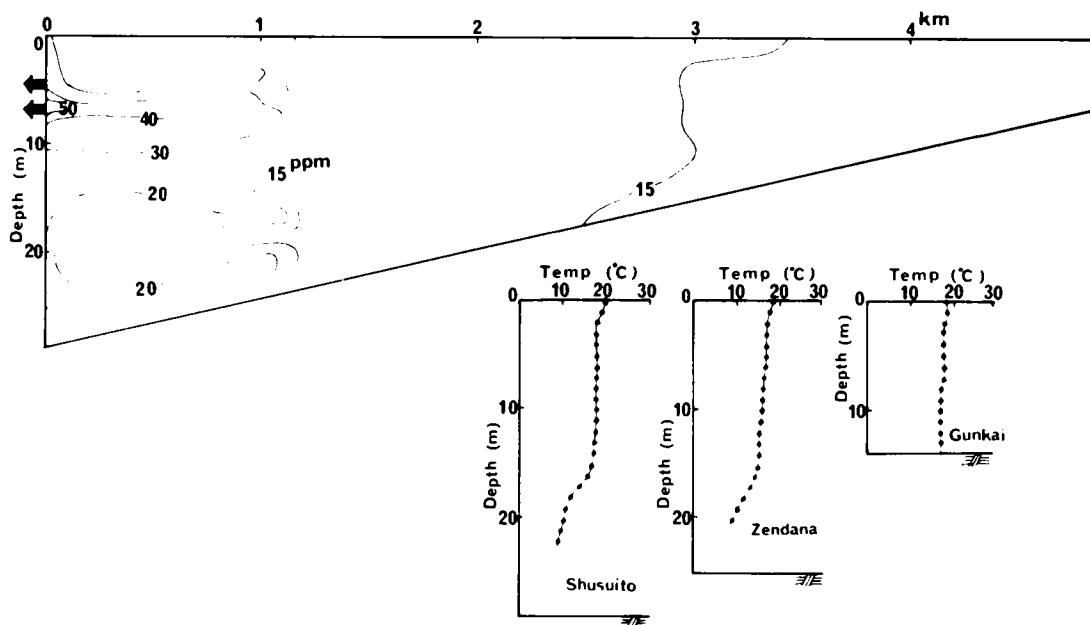


図 6 - 5 成層末期の貯水池内濁度分布 (千苺貯水池 ; 1973 年 10 月 23 日)

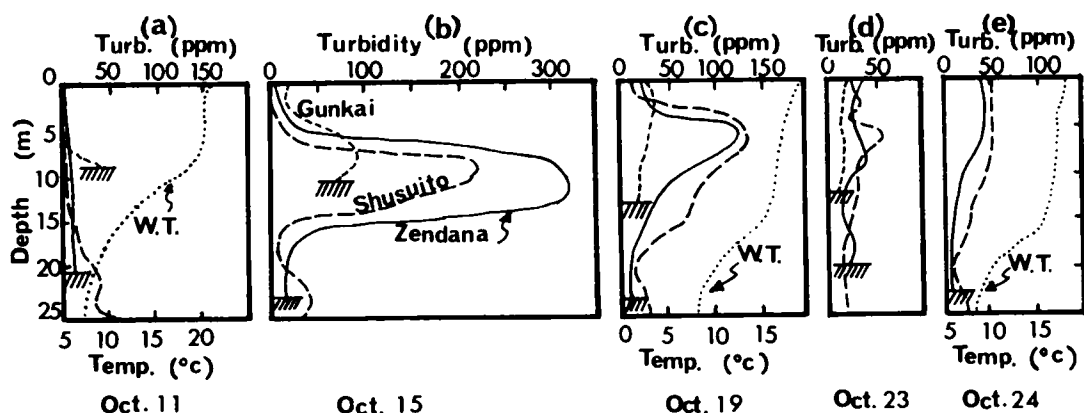


図 6-6 高水時の貯水池内濁度分布の変化（千苅貯水池；1973 年 10 月）

留分を減少させる一方、取水水質としては、選択取水によって表層あるいは、深水域など比較的濁度の低い水塊を選べばよい。そのためには、温度躍層の予想される水深付近に大きな放流口を設けておくことと、選択取水のための取水口を鉛直方向に数多く設置することが必要である。そうすれば、図 6-7⁶⁾ に示す貯水池下流の比較的高濁水の出現頻度を下げることができ、下流の水利用および水生生物への影響を和らげることになる。

2-3 溶存酸素の問題

一般に、およそ 15 m 以上の水深を有し、夏季に成層する貯水池においては、その成層状態下の温度躍層や深水域での溶存酸素の不足、すなわち、鉛直分布の不均衡が目立つ。これは成層した温度躍層の上下間での溶存酸素の補給がないまま、深水域では生物の呼吸、微生物の分解作用に利用されて減少一方となる。そして深水域における溶存酸素の涸渇は、マンガンを鉄の溶出、窒素やリンの栄養塩の再溶出をもたらし、底層水質の悪化を招き、富栄養化過程との関連は密接である。

この深水域水の水質改善の方法として考えられ、用いられているのが曝気あるいはエアレーションによる溶存酸素の補給法と、機械式攪拌による貯水池上下の混合法の 2 つであり、成層破壊を目的としている。前者はコンプレッサーと空気揚水筒などの組み合わせ方式であり、後者は機械攪拌単独、あるいは、機械攪拌とエアレーションの併用方式がある。いずれも水深 20 m 以内での実験報告が多く、大水深での使用は、コンプレッサーや攪拌機の仕事が水体の循環・混合を引き起こすまでに至らないことが多い。そして、その装置は底部近くに固定するためにけい留されるものが多いが、浅い水深に対しては浮上式のものもある。その使用例として間欠式空気揚水筒を用いたエアレーション法による結果を図 6-8 に示す⁷⁾。もちろん、温度躍層はほぼ消滅して、水質の一様分布化が進んでいることは明らかである。

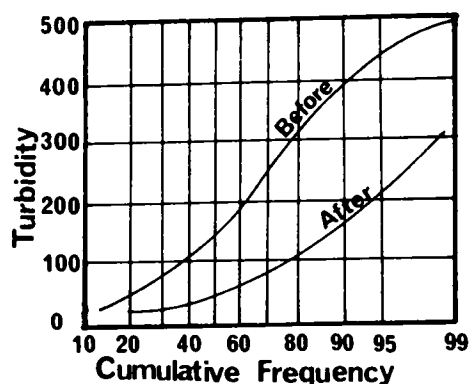


図 6-7 ダム貯水池築造による濁度変化（Powell⁶⁾ et al.）

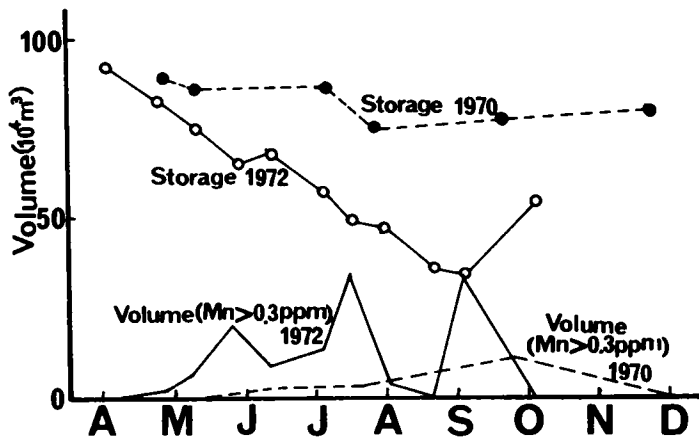
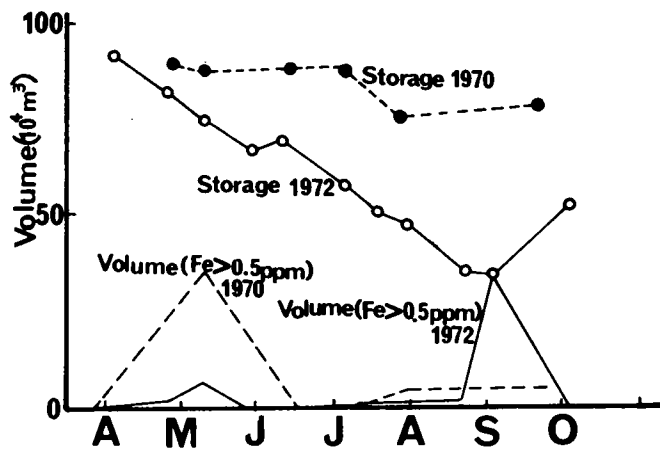
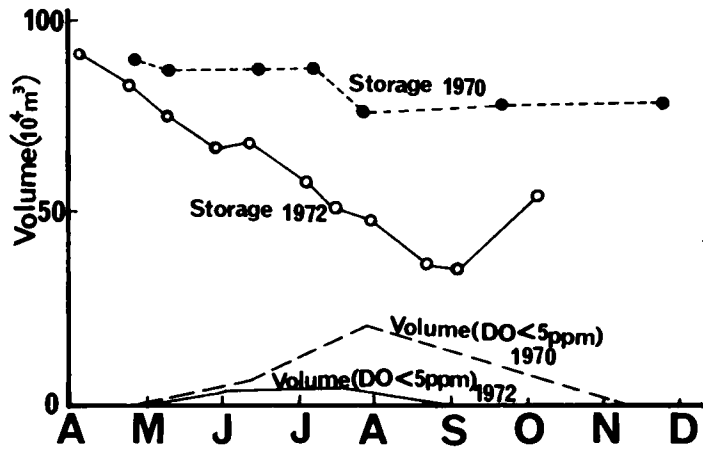


図 6-8 エアレーションによる水質変化 (白石貯水池⁷⁾)

貯水池には多かれ少なかれ堆砂による新しい池底面形成が常に行なわれており、とくに堆砂の多い流入端近くでの旧底面からの栄養塩やマンガ・鉄などの溶出は抑えられることが多く、ダム堰提付近の最深部での栄養塩やマンガ・鉄の濃度が高いのが普通である。そして、多目的ダムの取水口や放流口はその性格上提体の中間より下方に設置されることが多く、中間あるいは深層取水・放流になる。したがって、底層付近の水質の悪化した水塊を出水時などに濁水などとともにフラッシュアウトし、水質の良い水塊をその場に導くような流動を引き起こすことが必要である。しかし、これによって下流に放出された水質は再曝気による溶存酸素の補給や自浄作用による水質改善の距離区間が十分でないと、水生生物に対して害を与えるだけでなく2次汚染につながる恐れがある。

第3節 富栄養化問題

近年の人口増加と産業の発展は目ざましいものであり、これに伴う人間の生産活動と生産様式の量的かつ質的变化も著しい。この影響は都市域だけでなく農山村へも及び、その結果として貯水池の水質汚濁現象を重大化させている。すなわち、農業および畜産業において、化学肥料の大量施肥、合成飼料の使用は、生活廃棄物や畜産廃棄物の再利用など従来からの自然環元のシステムの枠から外れることが多く、畜産廃水や生活廃水などが大量に水域へ排出されるようになっている。すなわち、この汚濁負荷の量的かつ質的な変化に伴ない、窒素およびリンの栄養塩負荷量の飛躍的な増大を招き、湖沼のような静水域から、貯水池、さらに河川に至るまで富栄養化は波及しつつある。

貯水池の富栄養化の代表的な例として、相模湖（相模川相模ダム）が著名であり、これは図6-9の汚濁負荷の内訳に示されるように周辺都市の人口増加および生産活動の拡大に加えて、観光およびレクリエーション（主として魚釣り）による汚濁を含んだ都市型の汚濁タイプである⁸⁾。また、人口はかなり少ない農山村型の汚濁タイプの例として神流湖⁹⁾（利根川下久保ダム）がある。その汚濁負荷の内訳を図6-10に示す。千叡貯水池はまだ高い富栄養化の段階には至っていないが、後者のタイプであり、着々と富栄養化の過程をたどっている。他の富栄養化の例として、津久井ダム、青蓮寺ダム、高山ダムがある¹⁰⁾。

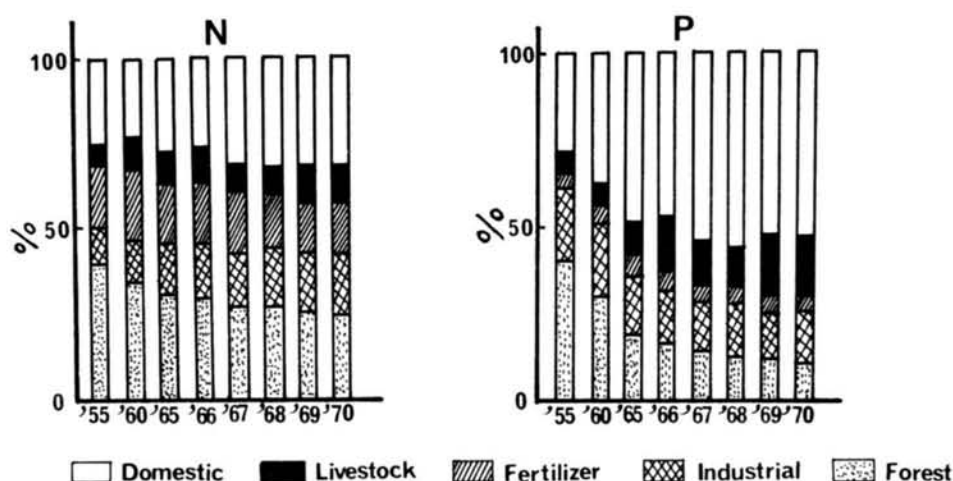


図6-9 (a)桂川流域における窒素・リンの発生源別流出割合とその経年変化（相模湖⁸⁾）

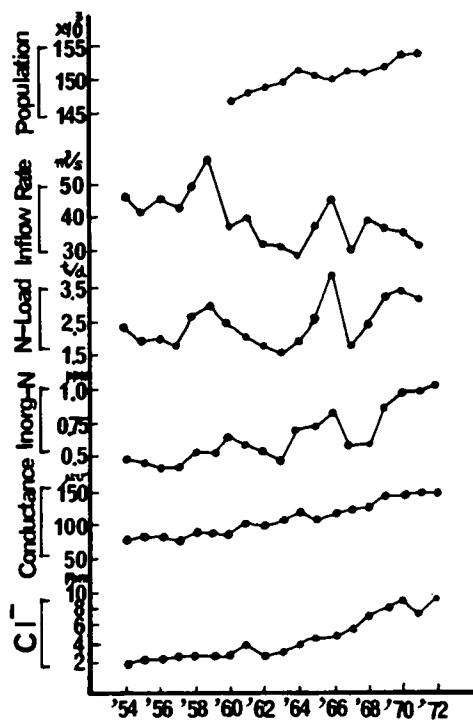


図 6 - 9 (b)桂川における水質等の年平均
 均値 (相模湖⁸⁾)

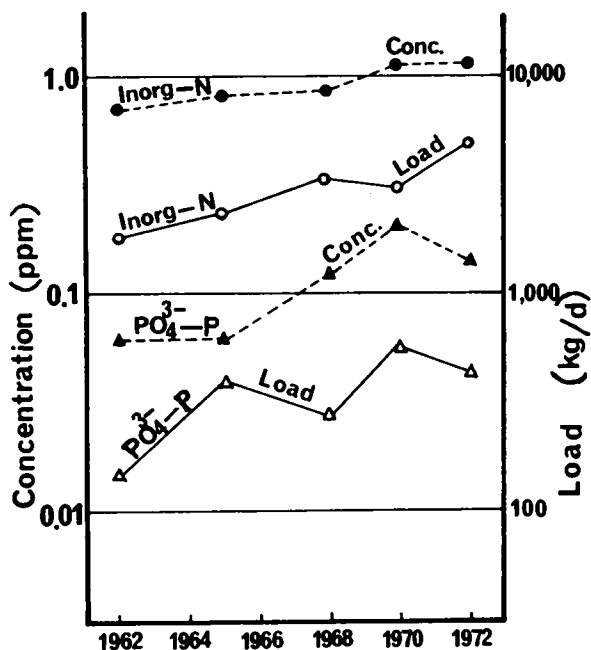


図 6 - 9 (c)窒素・リンの75 %非超過確率値の
 経年変化 (相模湖⁸⁾)

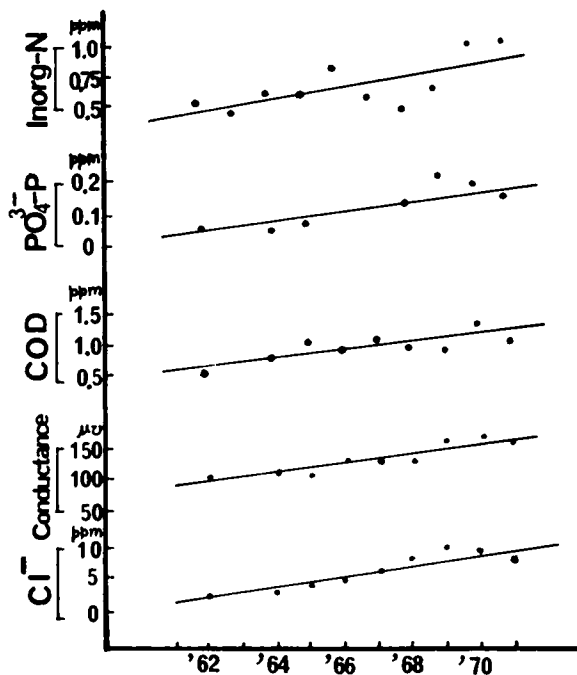


図 6 - 9 (d)低水量時における水質年平均値の経年
 変化 (相模湖⁸⁾)

都市型の汚濁タイプは、生活廃水および産業廃水の汚濁主導型であり、農山村型は生活廃水と、農耕地および畜産廃水、さらに山地からの栄養塩流出の主導型である。したがって、汚濁原因の相違によって、富栄養化の進行速度に大きな違いが見られる¹¹⁾。すなわち、都市型は、生活廃水や産業廃水の量的変化の影響が大きく、水質も急変することが多いが、農山村型は少しずつ、しかし着実に影響が現われ、水質も徐々に変化することになる。

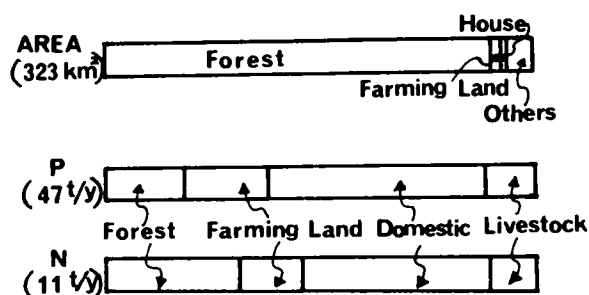


図6-10 土地利用の割合と栄養塩の流出率（神流湖，中本⁹⁾）

この水質汚濁あるいは人為的な富栄養化を抑えるには、栄養塩を含む汚水の流入を防ぐ以外に根本的な対策はなく、貯水池内では栄養塩の蓄積や回帰を少なくするような流動あるいは放流を試みる程度になる。すなわち、各種廃水の通常の処理をするだけでなく、栄養塩除去を目的とした高度処理を加えて、かつ処理水は天然の湖沼の場合でも考えられているように貯水池下流に放流する^{12,13)}。そして、貯水池では栄養塩を摂取している植物プランクトンを春のピーク時は梅雨期的大量流出を利用し、夏季のものは台風などによる高水流出を利用して、越流放流により貯水池外に出すことが考えられる。また、栄養塩を多量に含む深層水の放流も考慮されるが、これらは水系全体のシステムから見れば、根本的な系外への除去とはならず、二次汚濁を招く恐れがある。それゆえ、人為的な富栄養化の根本的な抑制は、汚濁水の流入を防ぎ、完全な廃水処理や有機的な自然のリサイクルを利用した廃棄物の処理・処分システムに向かうことが必要である。

貯水池水の富栄養化に伴う水利用上での水質障害は、有機性汚濁などに対して上水関係では前塩素処理などのプロセスを加えて対応しているが、植物プランクトンの大量発生によるろ過池の閉塞は選択取水で対応できる程度である¹⁴⁾。また、植物プランクトンは生体として水中に浮遊している間は水体に藻臭を発生させ、死骸となって深層水とくに底層付近に沈降すると、微生物の分解などを受け、カビ臭などを引き起こすことになる。また、底層付近での有機物の分解は溶存酸素の消耗、したがって、マンガンや鉄の溶出を招き、水処理上、さらに困難な問題を引き起こしている。千疋貯水池では、昭和49年4月中旬から6月上旬にかけての植物プランクトンの大量発生に伴い、ろ過池の閉塞に起因する逆洗回数の増加、したがって逆洗水量および逆洗汚水量の増加が起こり、臭気濃度の増加があった。これを表6-1にプランクトンの個数と分布を他の多量発生時とともに示し、図6-11にろ過池の逆洗回数の変化を、図6-12に臭気濃度とpHの変化を示している。また臭気に対処する水処理プロセスとしては、活性炭処理が用いられている。

このように、富栄養化に伴う植物プランクトンの増加、マンガンや鉄の溶出、臭気のいずれの問題も、発生後は水処理プロセスの経費の増大をもたらす。利用水の処理あるいは、貯留水のエアレーションによる水質改善などの対応策は本質的な解決にならず、流入汚水の排除という予防的な対策が必要であろう。

表 6 - 1 昭和 49 年藻類大量発生時の個数と分布

月日 水深 類名	昭和 49・5・8			昭和 49・8・14			昭和 49・11・13		
	0 m	1 m	3 m	0 m	1 m	3 m	0 m	1 m	3 m
珪藻類	11,154 (98.93)	11,858 (99.35)	10,344 (99.43)	638 (46.64)	700 (52.08)	456 (48.00)	6,136 (97.61)	6,640 (97.88)	5,228 (97.72)
緑藻類	62 (0.55)	54 (0.45)	38 (0.37)	666 (48.68)	588 (43.75)	450 (47.37)	150 (2.39)	144 (2.12)	122 (2.28)
藍藻類	48 (0.43)	16 (0.13)	10 (0.10)	64 (4.68)	56 (4.17)	44 (4.63)	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)
その他	10 (0.09)	8 (0.07)	10 (0.10)	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)
合 計	11,274	11,936	10,402	1,368	1,344	950	6,286	6,784	5,350
備 考；単位：個/ml，（ ）中は，全体にしめる割合（%）である。									

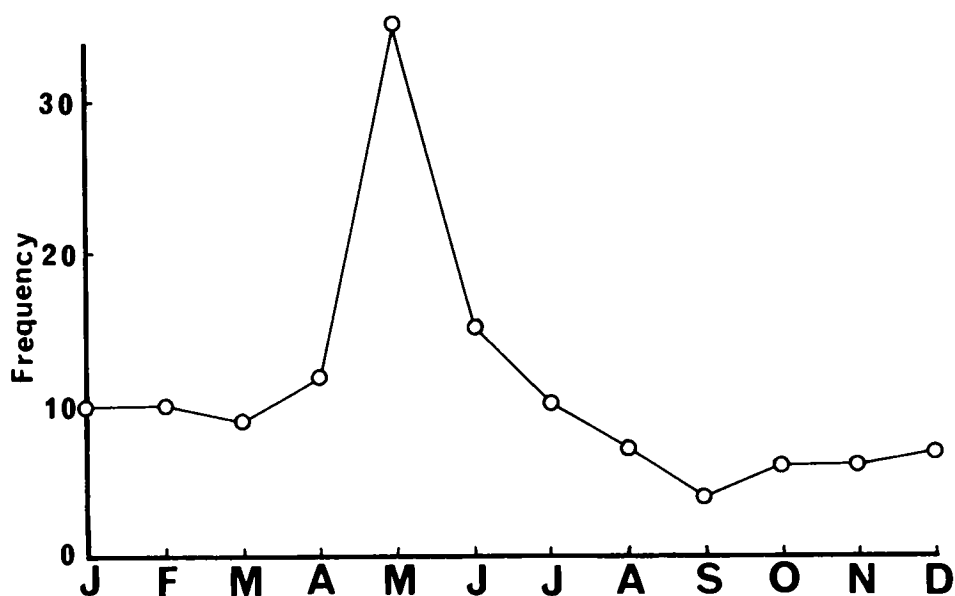


図 6 - 11 千苜浄水場 2 号ろ過池の逆洗回数(1974 年)

第 4 節 揚水発電用貯水池の問題

近年、発電の主力が火力および原子力に変わり、すなわち、水主火従から火主水従へと、水力発電の果たす役割が変わってきた。すなわち、昼間使用電力量と夜間使用電力量との差が開き、火力や原子力はその運転方式から常に一定の発電量が維持されるため、昼間のピーク時に水力発電の多くをあてることが一般化している。そして、この昼間と夜間の必要電力量の差、すなわち、余剰電力を無駄にしないために考

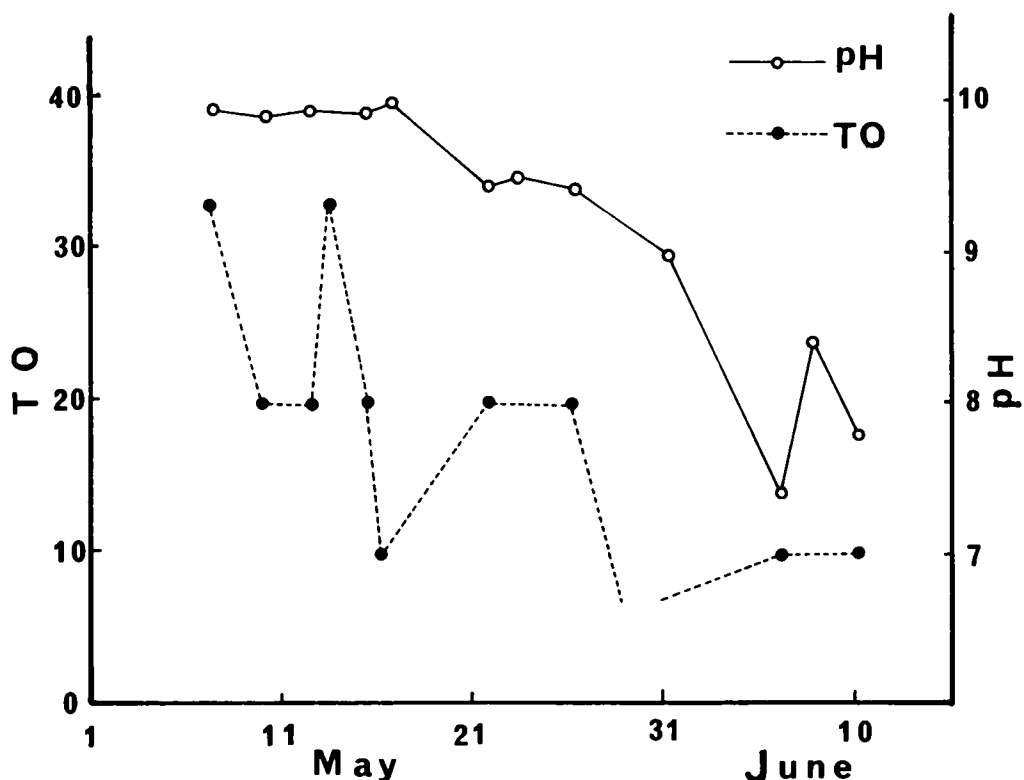


図 6-12 千莉貯水池 5 月～6 月の TO と pH の変化 (1974 年)

えられて登場したのが揚水発電である¹⁵⁾。夜間の余剰電力を、落差の大きな上下 2 つの貯水池の下池から上池への揚水に用い、昼間のピーク時にその落差を利用して上池から下池に水を落して発電するものである。

最近の電力量の需要増加に対して、火力および原子力発電は環境問題からその設置が進まず、クリーン・エネルギーとしての水力および揚水発電が見直されている。そして、企業の週休 2 日制の実施は、曜日間での使用電力量較差をさらに広げるため、夜間だけでなく、休日の余剰電力をも利用する揚水発電が一層注目されるはずである。水力および揚水発電では最初の設備コストが大きいだけでランニングコストは非常に小さく、むしろ立地条件の問題が多い。すなわち、電力の大消費地に近く、高落差で隣接する上下 2 つの貯水池が必要である。しかし、実際には上下 2 池のうち下池を他の既設の水域に代える場合が多く、それには既設の大きなダム貯水池や湖沼が利用される。また、上下の 2 池とも新設され、揚水発電だけに利用される場合はとくに純揚水発電と呼ばれる。純揚水発電の場合、貯水池の水は上下の移動、ポテンシャルの利用だけで、蒸発などの他には水量的にロスがない。すなわち、貯留水は同じ貯められた水の移動だけで、降水の流入・流出の他は水の入れ替わりがない。しかも、水位変動が激しく、上下 2 池の混合および池全体の混合度も大きいことが特色である。したがって、水の入れ替え量が少なく、かつ水量的なロスが少ない場合は流入水によってもたらされた物質は池内に蓄積され、あるいは濃縮される傾向が強くなる。さらに、電力の需要変動の状態によっては長期間運転されない場合もあり、このような状態の池は天然湖沼に似た性状を示すことになる。

揚水発電用貯水池の例としては、東京電力安積、沼原、関西電力の喜撰山、奥多々良木、中国電力の南原、中部電力の津久井があり、現在建設中や計画段階のものもいくつかある。このうち、上下2池とも新設された純揚水型は奥多々良木、南原であり、残りは混合型といわれる既設の貯水池を1池に利用するものである。

混合型揚水発電所の例として、喜撰山をとり上げると、下池である天ヶ瀬貯水池の容量が上池に比べて著しく大きく、上池の影響は下池の取水口付近にのみ限定されてしまっている。すなわち、水質的には大きな変化は認めがたく、上池からの放流時には取水・放流口より上流側の流速は低下し、下流側の流速は増大する¹⁶⁾。そしてこの流速変化の影響は浮遊物質の沈殿量に現われる。上池の喜撰山貯水池では、揚水・放流による流動および水位変化は、貯水池内の循環を引き起こし、混合度を大きくしている。その結果として、流入・流出口のあるダムサイト付近では夏季の水温躍層が消滅して、揚水・放流の影響の少ない上流側の水深10～20 m付近に温度躍層が残存する。そして、水深20 mの底層付近では他の一般貯水池と同様にマンガ、アンモニア態窒素、鉄、溶性ケイ酸などの増加が認められている。このように、下池に既設の大きな貯水池や天然湖沼を利用した場合、上池がよほど大きくない限り、下池への影響は揚水・放流口付近の局所的な影響にとどまる。上池は、下池の水質の影響を受け上下池とも水質の一様化に向かう他、揚水・放流に伴う流動による混合および水位変動によって水没した土壌面や草木などの間歇浸漬は、栄養塩の溶出を大きくしたり、分解作用を速めたりする。また、上下2池の水質一様化に伴ない生体系の安定化への時間は一般の貯水池に比べて短いと考えられる。上下2池の水質の比較を表6-2に示す。

純揚水型の例として奥多々良木をとり上げてみると、その混合型との相違は上下両池とも新設である点である。しかも運転開始までに、両池とも湛水開始後、ほとんど貯める一方で流出分が少なく、初期においては池底表面堆砂などで覆われることもなく栄養塩の溶出などにより、貯留水の栄養レベルは高くなることが多い。奥多々良木では、昭和49年夏季の最初の稼働期において、その電力需要の伸びが小さくとくに8月の稼働率は低かった。そのため、上下池とも、栄養塩を多量に含む溜池的な性状を示し、昭和49年8月の水表面ではpHは9.6、溶存酸素は113%と過飽和を示しており、栄養塩濃度としては、全窒素が

表 6-2

単位水面積当り沈殿物量（単位は $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ ）

ダム湖名	BOD	全窒素	全リン	乾燥物重量
天ヶ瀬	151	32.9	13.1	3,290
喜撰山	505	38.2	45.3	9,916

（昭和46年11月末）

各ダム湖の沈殿物量（単位は $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ ）

ダム湖名	BOD	全窒素	全リン	乾燥物重量
天ヶ瀬	284	61.9	24.6	6,185
喜撰山	152	11.5	13.6	2,974
合計	436	73.4	38.2	9,159

（昭和47年1月末）

0.31 ～ 0.47 ppm, 全リンが 0.028 ～ 0.044 ppm であった。また、同一地点で硝酸態窒素は 0.5 ppm, 亜硝酸態窒素 0.028 ppm, アンモニア態窒素は 0.09 ppm, リン酸イオンは 0.044 ppm という高濃度も見られた。さらに、揚水・放流に伴う上下 2 池の水質変化は、その水位変動と流動による混合により、図 6-13(a), (b), (c), (d), (e) に示すように SS の増加, COD の上昇を結果としてもたらしている。すなわち、底層付近の有機物質や濁質の浮上・循環によるものと考えられる。

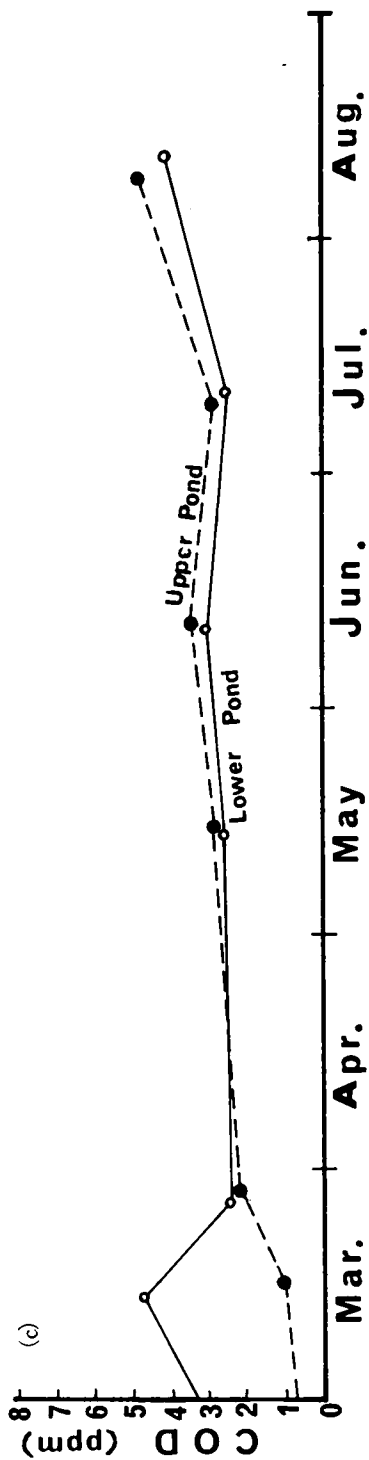
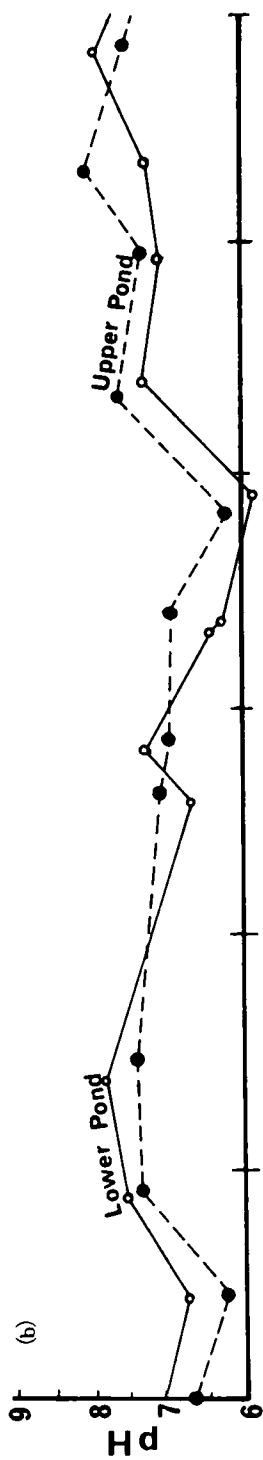
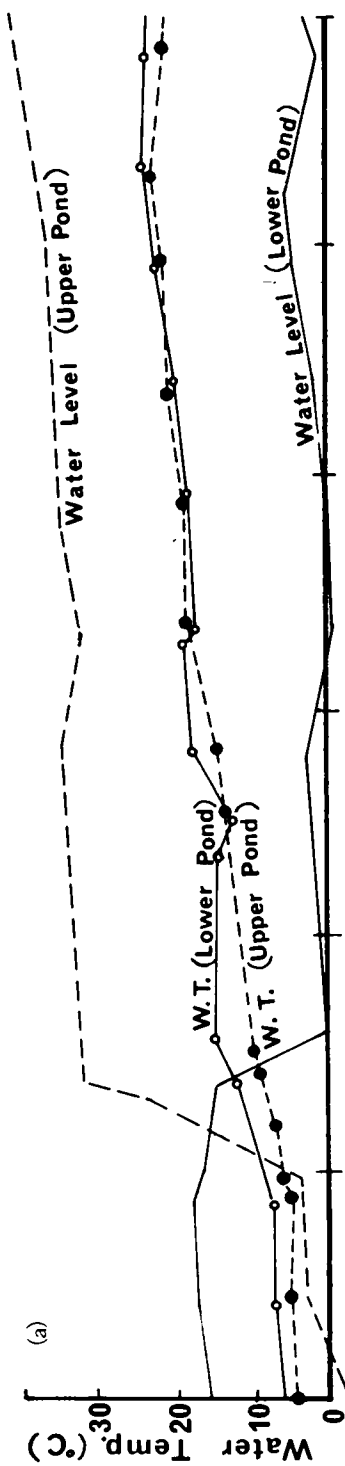
このように、揚水発電用貯水池は水の入替えが少なく、同じ水が上下 2 池の往復を繰り返すことも考えられるので、水質的には富栄養化と濁度の変化に注意を払うべきである。溶存酸素はタービンを通しての上下運動などの流動での曝気効果が期待できるが、混合による底質のまき上げなどにより、その分解に利用される量も増加し、全体的な増減は各種の状態によって異なることが予想される。

この揚水発電用貯水池の水質改善など水質管理上必要な措置は、上下 2 池の連絡水路を利用し、薬剤の散布やフィルターによる処理、さらには水質測定などその特殊性を利用した対応策を講じることが可能である。また、その水質変化は池自身の歴史も浅く、資料の蓄積も少ないため、今後も注目して観測を続ける必要がある。

第 5 節 今後の水質管理

貯水池の水質管理は、近年の水質汚濁現象や富栄養化現象を考慮すると、貯水池内の水質管理や制御だけにとどまらず、貯水池流入水の水質および水量の定常的な監視を行なう一方、定期的な上流の実態調査に基づいた流域要素の把握¹⁷⁾をしておく必要がある。そして、その流況変化に対応した水質汚濁対策を常に講じて、後手後手にまわらぬように、予防的な対応策がとれる態勢の整備が肝要と思われる。すなわち、土地利用状況の急変とか、工場・事業所等の汚濁源の新規立地についての監視、および場合によってはその規制の必要がある。なぜなら、汚濁物質が貯水池に一旦流入してしまうと、それに対する貯水池での処置は予防的ではなく対症療法的となり、貯水池でとれる対応策の自由度は、その上流域でとれる自由度より小さくなるからである。

一般に、貯水池でとりうることが可能な水質コントロールあるいは水質改善の方法には、表層取水を含めた取水および放流位置の複数化あるいは多段化による選択取水（放流）や、エアレーションおよび機械攪拌による混合および成層破壊などがある。前者の方法は、流動性に富み、人為操作が可能な人工貯水池の特性を生かした方法であるが、放流あるいは取水位置の変化によって流動すなわち流速分布の変化に伴う主躍層の位置の変化、したがって、水温分布形態の変化を導き、間接的に水質分布形態の変化を期待しようとするものである。これによって、取水される水質はかなり向上されるが、深水層とくに底層付近の水質劣化の改善までは期待しにくい。したがって、貯水池放流の位置として、底部近くに放流口を設置し、出水時の放流によって底層水をフラッシュ・アウト（flush out）することが考えられる。しかし、これは貯水池下流水質への影響が大きく、水系全体としての水質管理という観点に立つての配慮が必要と思われる。それゆえ、平常時の放流においても、深水層水とくに底層水の放流を、放流口にカスケード型の魚道のような水路などによって曝気効果を上げるなど、水質改善の方策を講じた放流法を考慮することが必要と思われる。これには、貯水池でダム・アップされた貯留水の下流河川との高低差を利用し、水体の位置エネルギーから運動エネルギーへの変換を利用して、水流としての混合や大気との接触時間を多くとって曝



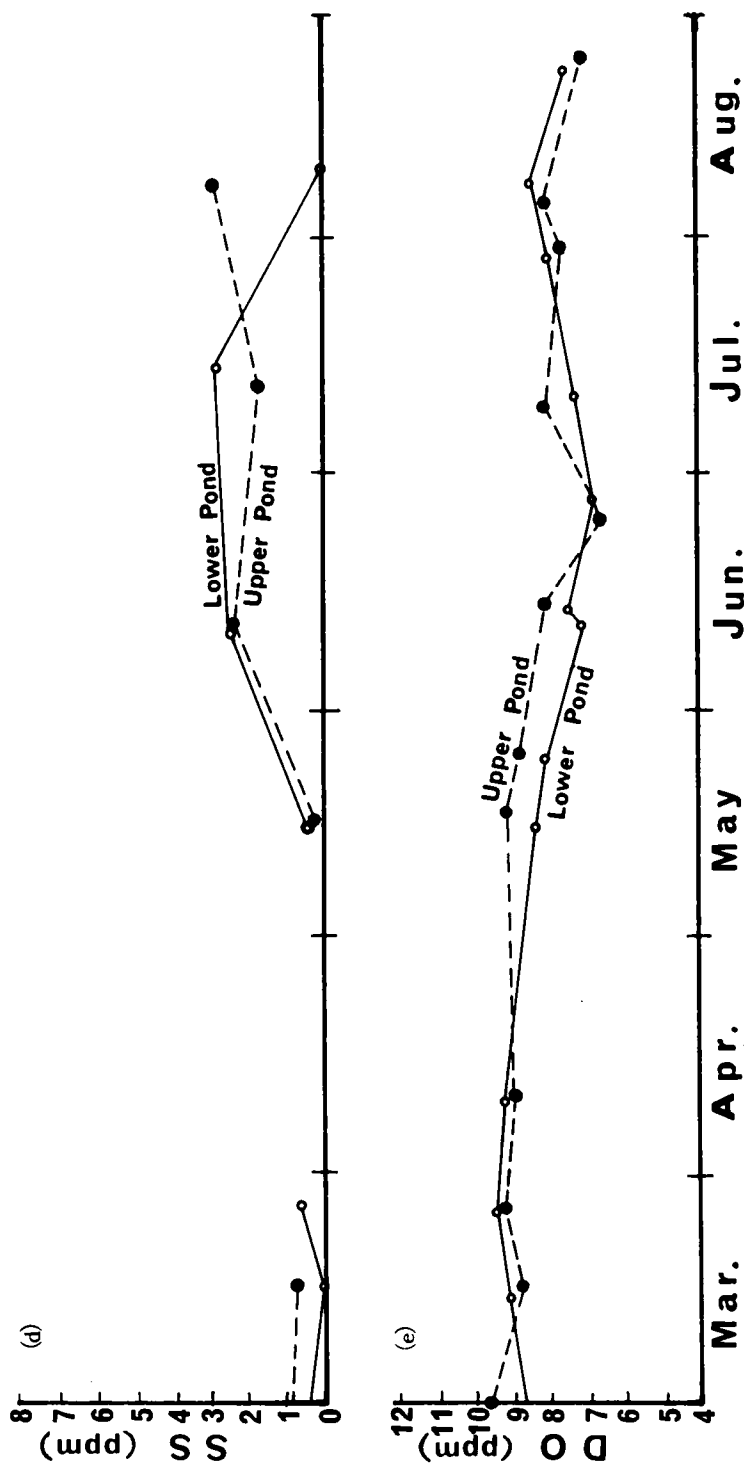


図 6-13 揚水発電に伴なう水質変化 (奥多々良木)

気効果を上げる放流水路など水質改善装置が経済的である。すなわち、後述の貯水池内でのエアレーションや機械攪拌による水質レベルの平均化およびそのコストを考慮すると、水質レベルの低い水体の抜き取りに伴う深層水の入れ替えが、水質レベルおよびコストの点から有利と考えられる。

一方、貯留水のエアレーションや機械攪拌による成層破壊および水質改善法には、散気管方式、ポンプ式、揚水筒方式、回転攪拌翼方式、攪拌空気注入併用方式などが考えられ、貯水池の規模や形状に合ったものの選択が必要である。

貯水池としては必然的に建設前と建設後では、その水質コントロールあるいは水質改善のための設備の設置や対応策が異なってくる。すなわち、建設前であれば、堤体あるいはその付近に水深の異なる複数個の放流管の設置により越流放流、中層放流および深層放流を可能にすることが必要である。また、取水塔は放流装置よりさらに多段の装置とし、表面取水から深層取水まではほぼ連続的な切り替えが可能な選択取水装置とすることが利水上肝要である。そして、貯水池の水深や形状、さらに水質分布に応じてエアレーションなどの水質改善の装置が付加できるような条件を満たすようにしておくことも必要である。また、貯水池が既設のものであれば、表層放流や表面取水を可能にするような放流および取水の装置改善を行なうほか、貯水池の状態に応じたエアレーション設備の使用の検討をする必要がある。この場合には、浮上式の各装置がいくつか考案されていて、規模や場所の状況に応じた設置法が工夫されている。

さらに、流入水の水質汚濁対策としては、新設・既設の別を問わず、汚水の流入を防ぐため、半静止水域である貯水池を避けて下流に導水して放流するバイパスの考慮も必要である。しかし、これは水系全体から考えると、汚濁が下流に移っただけで根本的な解決にはならず、汚水の高度な処理、とくに栄養塩の完全な除去を目ざす以外に真の解決法はない。

また、貯水池周辺の管理としては、レクリエーションや観光、さらに景観に対する監視も必要である。とくに、最近の休日の増加や余暇の利用の形態変化より、貯水池周辺での魚釣りやボート遊び、ハイキングやキャンプなどに伴う環境悪化は無視しえないため、貯水池の利用で協力を求めるなどその対策に留意することも重要である。

したがって、今後の水質管理としては、これらの貯水池水質への影響の度合を考慮して、流入水を中心とした上流の変化に注目しつつ、総合的な水質管理を目ざすべきである。

第6節 結 語

第2節の貯水池の冷水放流や濁水の長期滞留問題は、従来からの問題であり、ダム貯水池が多目的である場合はとくに利害得失がからんで解決が遅れている。冷水問題は、表層放流および表層取水の装置の付加で解決は可能となるが、濁水問題の根本的な解決は困難である。すなわち、高水時の貯留はその性格上必要であるため、その高水時の高濁度水を一部バイパスなどでカットするほか、高濁度水を深層に導入するような流動を生じさせる放流や取水を行なうなどの軽減策が考えられる。そして濁質の沈殿の促進をはかる程度である。

また、深層、とくに、底層の溶存酸素の低濃度問題には、放流や取水方法の変化により、高濃度流入水の導入が可能な流動状態を生じさせるほか、成層破壊および酸素の補給を目ざすエアレーション混合法

による対策が考えられる。したがって、これはマンガン・鉄や栄養塩の再溶出を防ぐ水質改善策として考えることができる。

第3節の富栄養化問題では、栄養塩濃度の高い汚水の流入を防ぐこと以外には根本的な解決はない。そして、上述の溶存酸素の低濃度問題とも関係し、深水層の放出あるいはエアレーションによって栄養塩の再溶出を防ぐことが考えられるが、エアレーションによる混合は、時期と場合によって栄養塩の回帰など混合によって逆効果をもたらすこともあるので、その利用には注意が必要である。

第4章の揚水発電用貯水池問題では、純揚水型の場合は水の入替わりが少なく、同じ水の循環使用のため、生物濃縮や蓄積の作用が大きいほか、流動や水位の変化が激しく、間歇浸漬は栄養塩の溶出や分解作用が大きいと考えられる。これらの新しい現象に対応する策としては、発電、揚水の度に水の通過する2池の連結管部を各種の処置や測定に利用するのが便利である。

第5節の今後の水質管理では、富栄養化や水質汚濁化がクローズ・アップされると予想されるので、管理も貯水池内での対症療法から、上流の汚濁源の改善などの予防療法への転換が必要であることを指摘している。

参 考 文 献

- 1) 建設省河川局監修：「日本の多目的ダム」 全国河川総合開発促進協議会 山海堂（1972）
- 2) 西村昭二：「人工湖水温の特異性」 水温の研究，Vol. 1，No. 2，pp. 25～32 （1957）
- 3) R. A. Elder and J. M. Garrison：“The Causes and Persistence of Density Currents” Water and Swege Water, Vol.112, No.11, pp.R144～R160 (1965)
- 4) 河川水温調査会：「水温利用に関する研究報告書」 河川水温調査会 （1962）
- 5) 半谷高久：「公害の克服」 （三省堂新書84） pp. 97～100 三省堂（1970）
- 6) M. P. Powell and P. M. Berthouex：“Water Quality Changes due to Impoundment.” Jour. of A.W.W.A. Vol.59, No.7, pp.829～834 (1967)
- 7) 柳瀬至康，石毛峯正：「曝気による貯水池の水質改善」 用水と廃水，Vol. 17，No. 1，pp. 35～43 （1975）
- 8) 「水」編集部：「汚濁進む相模湖—その実態を洗う」 水，Vol. 16，No. 1，pp. 30～34（1974）
- 9) 中本信忠：「神流湖の淡水赤潮について」 用水と廃水，Vol. 17，No. 2，pp. 65～71 （1975）
- 10) 河川協会：「河川水質年鑑」 1972年版 pp. 487～493 山海堂 （1973）
- 11) 井上頼輝：「水質汚濁の機構と富栄養化のモデルについて」 第9回水質汚濁研究に関するシンポジウム （日本水質汚濁研究会）講演集 pp. 37～62 （1975）
- 12) 津田松苗：「富栄養化は救えるか」 用水と廃水，Vol. 15，No. 1，pp. 3～8 （1973）
- 13) 山岸宏，沖野外輝夫：「湖沼の汚染」 pp. 76～121 築地書館 （1974）
- 14) 小島貞男：「ダム貯水に伴って起こる水質障害とその対策(1)，(2)」 工業用水，No. 41，pp. 9～14；No. 43，pp. 8～15 （1962）

- 15) 黒沢俊一：「水資源計画」（計画学講座 9） pp. 203 ～ 208 朝倉書店（1972）
- 16) 淀川水質汚濁協議会：「宇治川水質調査」（1974）
- 17) 合田健，海老瀬潜一ほか：「大滝ダム計画に関する学術調査」 pp. 537 ～ 613，防災協会(1967)

第7章 結 論

第1節 研究成果の総括

この研究では、貯水池の流動に伴う水質あるいは水質分布の変化について、観測・調査、模型実験、および理論解析を3本の柱として、それぞれの特色を生かした三面からのアプローチで総合的な現象の把握により、貯水池の水利用および水質管理のための水質制御の足がかりを目ざしたものである。その具体的な内容としては、貯水池内の流動変化に伴う水質分布の変化特性の把握に始まり、貯留水の取水あるいは放流に伴う水質問題として、貯水池内だけでなくその下流および上流を含めた水系という観点に立って、低水温放流や濁質の長期滞留などの従来からの問題、さらに、水質汚濁や富栄養化現象など水質悪化という現代の問題までを取り扱っている。

とくに、温度成層状態下における水質変化に注目して、温度躍層面を内部境界面と考え、成層流における物質移動現象とする決定論的な手法を取り入れた。さらに、水質の季節変化および経年変化の定量的な把握には、調和分析を含む時系列解析という統計学的な取り扱いも行なっている。この両方の取り扱い方を組み合わせて利用したものが、水質変化と生物量の相関の数学モデル化とその解析である。また、その取り扱いには、各種水質因子をその挙動や性質の共通性、およびその従属関係に基いたグループ分けを行なって整理している。

これらのアプローチによって得られた具体的な成果を、各章ごとにまとめて示すと以下のようになる。

まず第2章では、貯水池の水質変化の特色とその影響因子の関係を中心に、その一般的な特性について述べている。すなわち、環境因子としての貯水池の位置や形状などの地形的性質の影響度について概述し、貯水池内での水質変化に直接影響する流動パターンの重要性を指摘した。とくに、流速分布、水温分布、および水質分布の3者の関係の密接さを具体的に説明するとともに、各種水質をグループ分けすることによって、その一般的な分布特性および変化特性を詳述し、以下の各章でのまとめ方の基本姿勢を示している。

第3章においては、実際の貯水池観測の具体例として、千苅貯水池の観測・調査結果を示し、水質変化の現象を定量的な関係式によって把握をしている。すなわち、著者らの1年間の調査および過去8年間の神戸市の観測資料に基いて、1年を周期とする季節変化(周年変化)と富栄養化などの長期傾向を示す経年変化に分けて、時系列解析を行ない、調和分析による関数表示を行なった。これより、ほとんどの水質因子が1年を卓越周期とする周年変化を示し、栄養塩濃度および汚濁水質指標は、1年周期の季節変化に加えて、着実に上昇する経年変化が定量的に求められた。これらは表水層、温度躍層、および底面付近での変化が著しかった。このような水質変化の時系列解析による数式表示から、富栄養化や水質汚濁の実質的な傾向把握や鉛直分布特性の選択取水への有効利用は水質管理において重要な事柄である。また第4章では、実際の貯水池観測では得られない流動と水質変化の定量的な関係を把握するための模型貯水池での実験について述べている。ここでは、人工的に温度成層状態をつくり出し、まず水温と流動の関係、すなわ

ち、温度成層状態と流速分布の関係をもとに、浮遊性物質と溶解性物質の流動に伴う挙動を明らかにするとともに、温度躍層付近を中心とした成層状態下での物質移動として定量的な変化を把握し、数学モデル確立の基礎とした。また、用いた模型貯水池が歪模型であり、その実際現象への適用のため相似則の検討も行なっている。とくに人工的な温度成層流状態の工夫は先駆的なものであり、温度成層流における水質変化の実験的な研究に新しい手法を加えた。そして第5章においては、水温、浮遊性物質、溶解性物質、溶存ガスについて、層分割による3つの解析モデルに基づく物質収支式による理論解析を中心に、統計的な解析をまじえて論述している。すなわち、非定常2次元の偏微分方程式を基本式として、電子計算機による差分式数値解の他、非定常1次元、定常2次元へと基本式の簡略化による理論解を得ている。また、水質変化と生態系の関係として、植物プランクトンと水質変化の関係を、非定常2次元の物質収支式の差分式表示によって、水質変化に時系列解析結果を代入して、電子計算機により数値解を得た。このモデルにより植物プランクトンの周年変化は実際の観測値にかなりよくフィットした形で得られる。貯水池の水質変化で支配的な位置を占める水温の変化特性の把握を基礎に、浮遊性物質や溶解性物質の挙動特性を知ることが選択取水など水利用上の利点となる。また、貯水池内の栄養塩などの外的環境条件の変化に対する植物プランクトン量消長のシミュレーション解析は、栄養塩濃度の植物プランクトン量に対する影響度の大きさを指摘することができ、ダム貯水池の富栄養化抑制のための貯水池集水域を含めた水質管理への応用につながるものである。さらに第6章においては、貯留水の水利用、あるいは水系全体の水質管理の観点から、実際の貯水池の水質問題について、水質制御を含めた水質管理についての提言を行なった。すなわち、放流水温の低下、濁質の長期滞留、放流水の高濁度の長期化、深水層とくに底層水の悪化などの水質障害に対して、その問題点の明確化と制御を含めた対策を述べている。さらに、富栄養化に対する上流を含めた水質管理や、近年増加しつつある揚水発電用貯水池の水質変化の特性把握による水質管理を提言している。

第2節 今後の課題

貯水池の水質分布の変化が流動パターンによって支配されることはこの研究によって明らかにされたが、流速分布の観測は困難を伴うため十分行なえなかった。高水時の流動や、温度成層状態あるいは水温一様状態下の流動など、一年を通しての流動変化を精度良く把握でき得るならば、流入物質の実質滞留時間の推定や混合などによる挙動を追跡することができる。さらに、シミュレーションモデルの高精度化を目指すには、流速分布変化の精度を水質分布変化の精度までレベルアップさせる必要がある。

この研究で対象とした千苅貯水池は、貯水池形状が比較的単純でかつ流入河川の流入点が上流端に限定され、放流や取水の条件がほぼ一定し、水位変動が小さく安定した貯水池であるため、さらに条件の複雑な貯水池などへ範囲を拡大して解析の適用を試みるものが残されている。

貯水池の水質問題は、貯水池内だけでなく、上下流を含めた水系の問題として捉え、流域内の人口や生産活動の動態変化の情報を得て、汚濁負荷量などの観点から上流域での水質規制を含む具体的な水質管理への提言を行なうことは残された問題として重要なものである。

この研究では現象がかなり明確で単純な形状の貯水池の水質変化の機構を中心に展開してきたが、実際

の貯水池での水質変化現象は複雑な場合が多い。したがって数多くかつ多種の貯水池の実際現象の例を比較することによって種々の角度から水質変化の機構を明確化することが重要と考えられる。実際の貯水池水質管理としては、水質変化の現状把握を基礎とし、将来の流入水質の予測をもとにシミュレーションモデルの数値実験によって植物プランクトン量の出現レベルの推定など予防的な対策や制御へと向かう必要がある。この水質変化および植物プランクトンのシミュレーションモデルの精度の向上と、適用範囲の拡大により、水質変化の予測や水質管理の指針として有効で総合的なシステム解析へと発展させるべきである。

記 号 表

E : 鉛直安定度	C : 摩擦係数
ρ : 水の密度	ε : $\Delta\rho/\rho$
θ : 水温	u_i : 上層(あるいは下層)の流速
c : 浮遊性物質濃度	h_i : 上層(あるいは下層)の水深
s : 溶解性物質濃度	c_p : 定圧比熱
p : 圧力	Q : 熱量
Ri : Richardson 数(無次元)	k_a : 大気 of 熱伝導係数
g : 重力加速度	Q_a : 大気 of 温度
u : 流下方向速度	ρ' : 大気 of 密度
z : 水深方向距離	c_a : 大気 of 比熱
Ei : 乱流拡散係数	λ_i : 熱伝達係数
\bar{u} : x_i 方向 of 平均流速	θ_w : 表面水温
u' : x_i 方向 of \bar{u} の変動成分	LE : 潜熱交換
\bar{c} : 拡散物質 of 平均濃度	q : 比湿
c' : 拡散物質 of \bar{c} の変動成分	e_a : 大気中 of 水蒸気圧
t : 時間	e_w : 表面水温 θ_w に対する飽和蒸気圧
C_i : i 水質濃度	D' : 飽差
Q_i : 流入水量	e_{as} : 気温 θ_a に対する飽和蒸気圧
r : 相関係数	A_0 : 反射率
Z_i : 取水あるいは放流位置	I_0 : 日射量
x : 流入端からの距離	R_n : 正味の長波放射
X : 流出端からの距離	θ_e : 池底土 of 温度
C_0 : 一様な初期濃度	θ_w : 底面付近 of 水温
A : 流水断面積	F : $\frac{\partial c}{\partial z}$
h : 水深	k : 再浮上現象 of パラメーター
v : 断面平均流速	κ : 反応係数
i : 水路床勾配	w_0 : 沈降速度
n : 粗度係数	DV : $\frac{\partial \rho}{\partial z} \cdot \frac{\partial u}{\partial z}$
α_m : 運動量補正係数	T : アルカリ度
R : 径深	H : 水素イオン濃度
K_i : i の縮尺	K_1, K_2 : 溶解度定数
ζ : 水面上昇量	L_0 : 水深 0 m of 光 of 強さ

L : 水深 z m の光の強さ	g_z : 捕食係数
μ : 光の減衰係数	S : 沈降による除去係数
G : 増殖速度	O : 溶存酸素濃度
D : 呼吸速度	O_s : 飽和溶存酸素濃度
ν : BOD 濃度	K : 飽食効果の係数
k_3 : 脱酸素係数	x_p : 植物プランクトン最大濃度
k_2 : 再曝気係数	T_r : 透明度
Z : 動物プランクトン濃度	

付 録

1. 水質変化の時系列解析について

水質変化の時系列解析は毎月1回約8年間の水質変化の観測値を水質時系列の標本とし、その母集団である確率過程（系列）の特性を見出し、将来の予測を確率的に行なうことができる。この水質時系列の変動には、測定や観測方法に依存する因子のほか偶然に支配される因子も含まれるが、貯水池の各地点、各水深の水質は相互に独立ではなく依存関係が強い。したがって、季節変化および経年変化を含む貯水池の水質変動を複合調和波を含む時系列として自己相関係数によって分析することになる。すなわち、時系列の平均値、分散、系列相関係数を求め、その長期傾向（trend）成分の有無を吟味の上、定常化された系列について循環（周期）変動成分を調和分析により、調和波の結合として表わす。

貯水池の水質汚濁や富栄養化の傾向を、それぞれと関連する水質因子について、時系列の長期傾向の有無で従来の経年変化を量的に把握する一方、長期傾向のあるものについては傾向線のあてはめによる外挿法で将来の予測も行なえる。また、周期的な水質変化機構の解明には、周期変動成分の12カ月周期変動成分の強さ、その振幅の大きさ、位相角に基づくピークや谷の出現時期などの諸特性について、各水質因子間、各地点間および各水深間での相異の比較検討が重要である。また、この解析による水質変化の複合調和波による近似式は、水質因子と植物プランクトンとの関係の生態学的シミュレーション解析に利用することもできる。

なお、この解析に用いた式は参照のため最後に別記する。また、残差については観測誤差と採水時の特異現象の出現などによるものと考えられ、その大きさは各水質因子の変化の安定性の度合に帰因すると思われる。千苅貯水池では、昭和45年春の植物プランクトンの大発生、昭和47年夏から秋のゴルフ場造成工事による高濁質の流入、昭和48年夏の濁水などの影響が大きいと考えられる。

時系列解析に用いた式

N 個の観測値 $x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_N)$ を x_1, x_2, \dots, x_N とする。

$$\text{系列平均値: } \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

$$\text{系列分散: } S^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 - \bar{x}^2$$

$$\text{系列相関係数: } r_k = \frac{1}{S_1 S_2} \left\{ \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x}_1)(x_{i+k} - \bar{x}_2) \right\} = \frac{1}{S_1 S_2} \left\{ \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} x_i x_{i+k} - \bar{x}_1 \bar{x}_2 \right\}$$

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} x_i, \quad \bar{x}_2 = \frac{1}{N-k} \sum_{i=k+1}^N x_i$$

$$S_1^2 = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x}_1)^2, \quad S_2^2 = \frac{1}{N-k} \sum_{i=k+1}^N (x_i - \bar{x}_2)^2$$

定常化ののち、 $x_r(t)$ を残差として、 M 個の調和波により、

$$\begin{aligned} x(t) &= \bar{x} + \sum_{i=1}^M C_i \cos(\omega_i t - \theta_i) + x_r(t) \\ &= \bar{x} + \sum_{i=1}^M (A_i \sin \omega_i t + B_i \cos \omega_i t) + x_r(t) \\ A_i &= C_i \sin \theta_i = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N x(t) \sin \omega_i t \\ B_i &= C_i \cos \theta_i = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N x(t) \cos \omega_i t \\ C_i &= \sqrt{A_i^2 + B_i^2}, \quad \theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{A_i}{B_i} \right) \end{aligned}$$

また、 i 番目の調和波の平均値 \bar{x} のまわりの分散 S_i^2 は

$$\begin{aligned} S_i^2 &= \frac{C_i^2}{2} \quad \left(i < \frac{N}{2} \right) \\ S_i^2 &= C_i^2 \quad \left(i = \frac{N}{2} \right) \end{aligned}$$

i 番目の調和波による分散の、全体の分散に対する比率は

$$\begin{aligned} C_i^2 / 2S^2 \quad & \left(i < \frac{N}{2} \right) \\ C_i^2 / S^2 \quad & \left(i = \frac{N}{2} \right) \end{aligned}$$

となり、その調和波の全体の変動に対するウェイトの目安とすることができる。

Ⅱ. 栄養塩および有機汚濁物量の収支について

貯水池の富栄養化や水質汚濁の機構を明らかにするには、貯水池へ流入した物質が流入から取水（あるいは放流）されるまでの滞留期間に、どのような経路あるいは変化過程を経るかを把握することが重要である。したがって、富栄養化に関しては栄養塩としての無機態窒素量、有機水質汚濁指標としては KMnO_4 消費量より換算した COD_{Mn} について、流入量、流出量（取水量＋越流放流量）および貯留量から貯水池としてのマクロな物質収支を考察してみる。

i 月の総流入水量を Q_{I_i} 、 i 月の総取水量を Q_{W_i} 、 i 月の総越流放流量を Q_{D_i} 、 i 月の平均貯水量を Q_{S_i} 、 i 月の流入水流入端濃度を C_{I_i} 、 i 月の貯水池取水口濃度を C_{W_i} 、 i 月の堰提前表面水濃度を C_{D_i} 、 i 月の貯留水平均濃度を C_{S_i} とする。これらから注目する水質量について、 i 月の流入量(I_i)= $Q_{I_i} \cdot C_{I_i}$ 、 i 月の流出量(O_i)= $Q_{W_i} \cdot C_{W_i} + Q_{D_i} \cdot C_{D_i}$ 、 i 月の貯留量(S_i)= $Q_{S_i} \cdot C_{S_i}$ となる。さらに、 i 月の生物・物理・化学的作用による増減量 F_i が加わってマクロな物質収支式が成立する。すなわち、

$$\Delta = S_{i-1} + I_i - O_i - S_i - F_i$$

ここで、流入量 I_i については、各流入水系別に流入水量と流入水濃度の積を求めた和を用いるべきである。また、 F_i は流水中での変化分 F_{1i} 、底質による寄与分 F_{2i} 、水質によっては、大気と水体との間での移動量 F_{3i} とに分けることができる。 F_{1i} には、生物化学的な作用による分解・減少や、生物体による摂取が考えられ、 F_{2i} には、底質への沈殿・吸着や、底質からの溶出・浮上などが考えられる。また F_{3i} には、溶存酸素、炭酸ガス、 NH_3 、 N_2 などの気体の水表面を通しての移動量が考えられる。

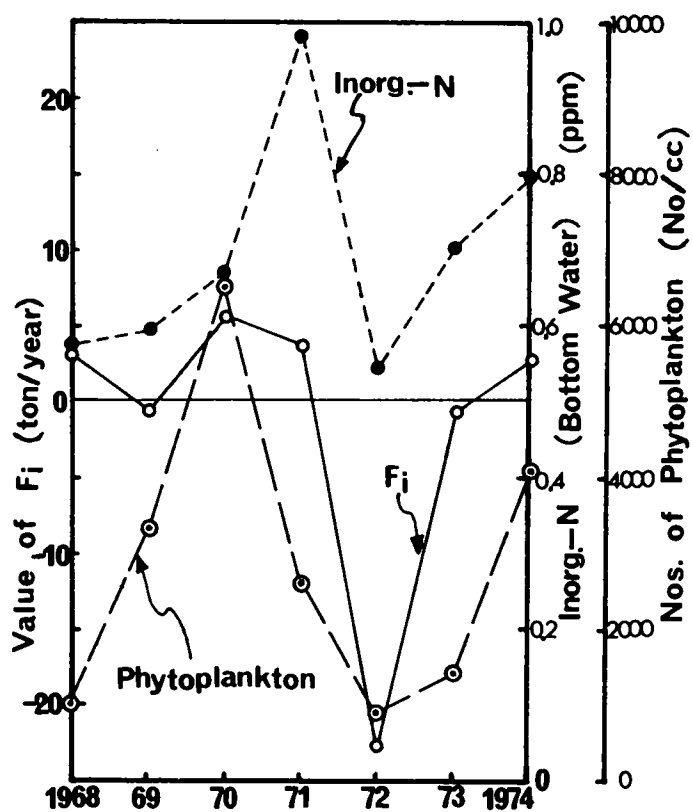
この各月ごとの計算例を千疋貯水池の昭和43年から昭和49年までの7年間について、7年間の経年変化と昭和49年1年間の周年変化を付図-1～付図-4に示す。貯水池貯水量、流入水量、取水量、越流放流量は毎日のデータからの算出値であり、水質濃度は毎月1回の観測値である。流入量については、両流入河川と周辺流入水についての和を用い、取水口を複数使用の場合はそれぞれの取水口水深の平均水質濃度を用いた。貯留水の平均水質濃度は、A地点（合流点）、C地点、D地点、E地点（堰提前）の4地点の水深方向に2～3m間隔で測定された全観測値約40個の平均である。水質濃度は1カ月1回の観測値であるが、貯水池の滞留時間がおおよそ50日前後であり、水質が安定した周期変化を繰り返していることを考えれば、この近似計算は許容しうる程度のものである。

F_i の項に生物体と水体との間の摂取量や代謝・排泄物量、底質と水体との間の物質移動量、大気と水体との間の気体の移動量、などを考慮することにすれば、マクロな物質収支式の Δ はゼロと考えて、 F_i の大きさを検討すればよい。

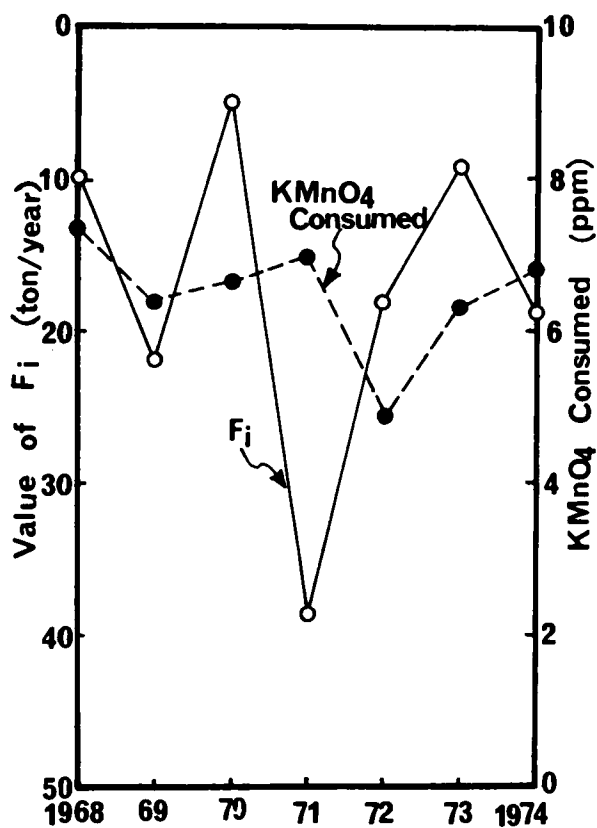
$$F_i = S_{i-1} + I_i - O_i - S_i$$

上式による F_i の大きさと内容の検討は、貯水池内での蓄積量や自浄効果の評価を与えることになる。

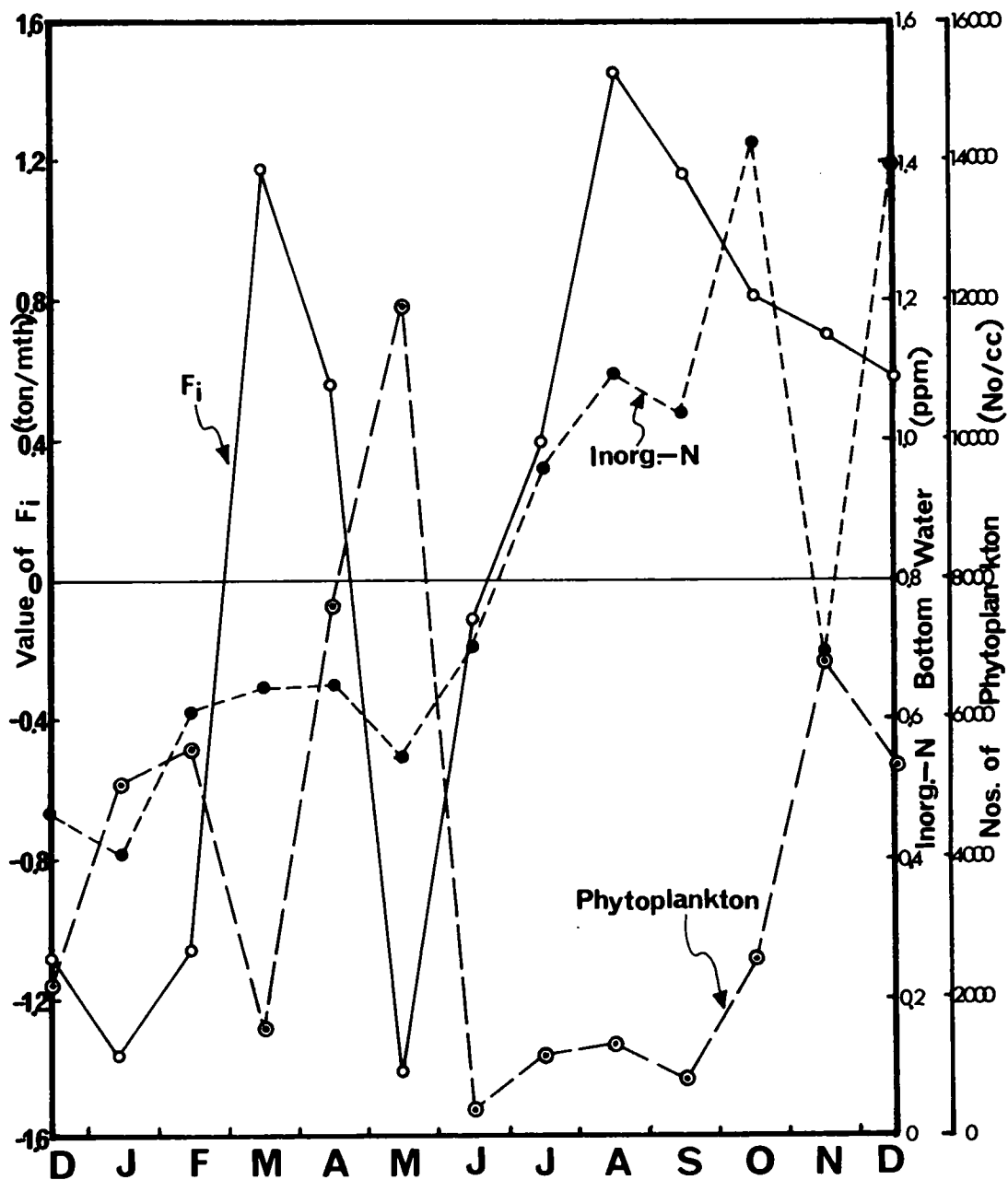
付図-3の昭和49年の無機態窒素量の変化より、春の5月および冬の12月～2月に F_i の値は負になる。5月の場合は植物プランクトンの大発生時と一致する。また他の年の春季の植物プランクトン大発生時の F_i の変化の傾向も考慮すると、大発生した植物プランクトンの栄養塩摂取に伴う水体から生物体への窒素の移行が F_i の負の値をもたらすと考えられる。また冬の場合は、秋の終りの全循環（overtorn）混合



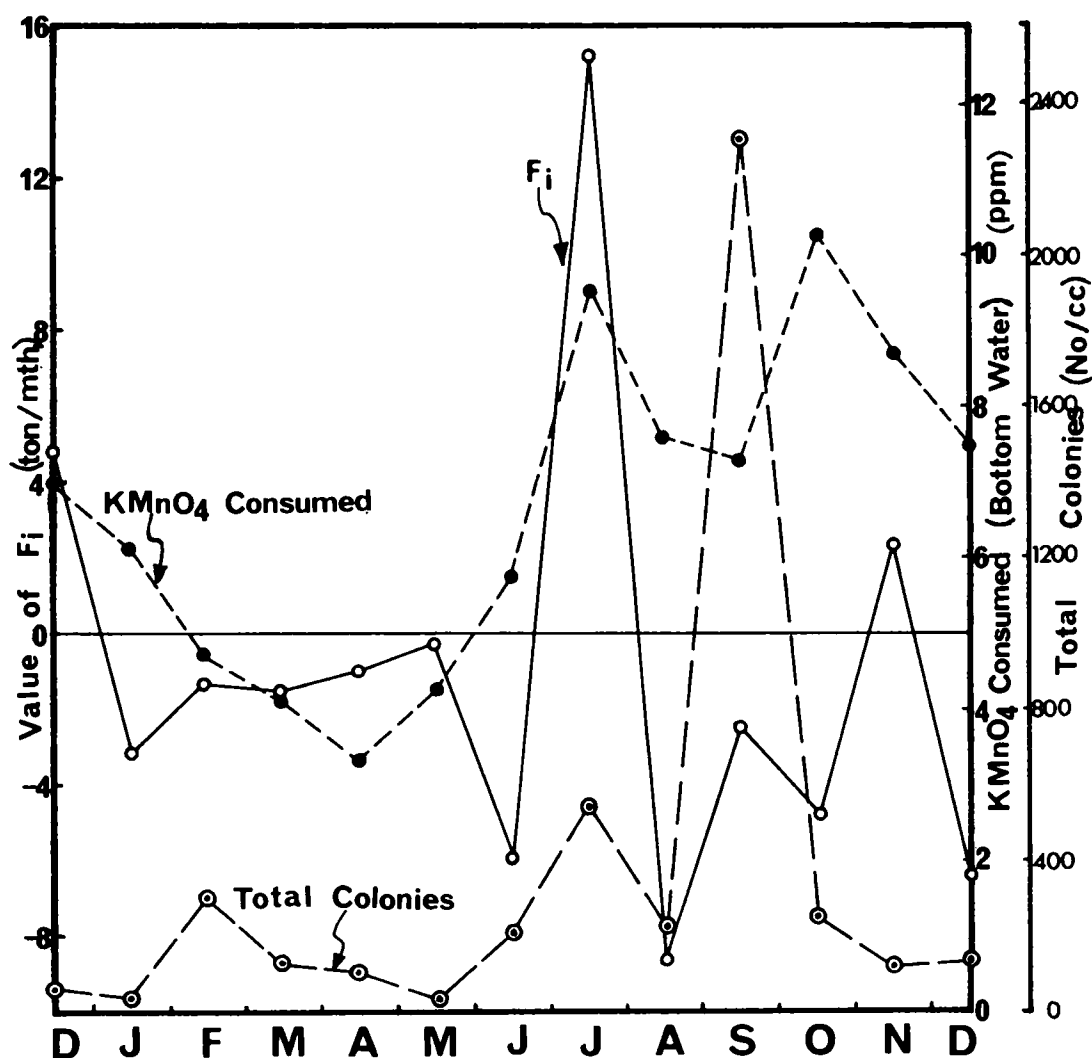
付図-1 無機態窒素についての F_i 値の経年変化
(千苺貯水池)



付図-2 COD_{Mn} についての F_i 値の経年変化
(千苺貯水池)



付図-3 無機態窒素についての F_i 値の周年変化
(千苺貯水池；1974年)



付図-4 COD_{Mn} についての F_i 値の周年変化 (千莉貯水池; 1974年)

による底質と水体との間の物質移動の結果として、底質が好氣的となり、窒素量に対してそれまでと異なった寄与をするが、12月～2月頃には沈殿する浮遊物質への吸着や好気化された底質中への拡散浸透などの trap 現象が F_i の負の値をもたらしたものと考えられる。経年的な変化としては無機態窒素の一部貯留蓄積が見うけられる。

春先の3月と夏から秋にかけての8～9月のピークと、冬季の1月と春季の5月を谷とする F_i 値の周年変化と、それとはおよそ2～3カ月遅いのピークを有する植物プランクトン数の周年変化との対応関係が重要である。これより、植物プランクトン量が減少し、窒素量の水体への移行によって、貯水池内に貯留される無機態窒素が増加傾向となり、つぎに植物プランクトンが増殖するための潜在ポテンシャルを高めていることがわかる。貯水池内での無機態窒素濃度の鉛直分布の変化、植物プランクトン量の変化、およ

び F_i 値の変化は、成層による停滞や循環による混合を含む貯水池内での流動変化の特性との関連で、一定の時間的なズレを伴った機構であることが理解される。

付図-4の昭和49年の COD_{Mn} 量の周年変化から、梅雨による出水かつ成層期の7月を除くと1年を通してほぼ減少傾向にあり、ミクロには多くの複雑な作用が関わっているものの、包括していえば、貯水池内での生物、化学および物理的浄化作用として評価できる。しかし、 COD_{Mn} 量の減少に伴う分解産物は栄養塩として貯水池内の生態系を通して利用され、貯留水および底質の栄養塩濃度の変化をもたらし、前述の窒素の挙動の一端を担うことになる。夏季成層期の7月に見られる F_i 値の増加は、植物プランクトンなど有機物の分解や、底層水の嫌気状態化に伴う底質から水体への負荷の移行によるものと考えられる。秋季の11月の F_i 値の増加は、全循環直前までの底層水の悪化、すなわち、底質から底層水への負荷の移行によると考えられる。

これらのことから、有機性汚濁物質量は貯留期間中に減少し、一部栄養塩として、植物プランクトンなどの生物体や底質と水体との間を移動し、貯水池内に貯留あるいは蓄積されることになる。

ダム貯水池における有機物などの沈殿・吸着・堆積による新底質の形成は、水質の水体から底質への移行をもたらす。とくに、高水時の無機性の濁質粒子の沈殿・堆積に伴う旧底質の被覆および新底質表面の形成は、旧底質からの栄養塩、鉄、マンガンなどの溶出や、有機性沈殿物の浮上を抑制することになり、貯水池自身は堆砂による容量減少によってその寿命および能力を縮小することになる。千苅貯水池では、昭和47年梅雨以降羽束川上流のゴルフ場造成工事による高濁質の流入および滞留が、植物プランクトンなどの生物を窒息させ、従来からの栄養塩や有機物などの堆積物あるいは蓄積物を底質深部に内包するという結果をもたらした。底層付近の水質は一時的に回復した形となった。これは付図-1と付図-2からも確認することができる。ダム貯水池の富栄養化は、このような要因がブレーキとなり、流入栄養分のかなりの部分が流出してしまうこととも併せて、湖沼などの富栄養化と対比して捉えることができる。

このように貯水池の水質変化機構を、流入量、流出量、貯留量に加えて、水体と底質や生物体との間の水質の移動としてマクロな物質収支で捉えることも重要である。水質は流入変化としては季節的になり差のある変化を示すが、流出量とのバランスや滞留時間の大きさ考慮に入れると、貯留水全体の変化として取り扱い、夏季の成層状態、冬季の水質一様分布状態およびその遷移状態を通じて、水質の偏在化あるいは一様化という現象とは別に、水質の減衰化あるいは貯留蓄積化という形で貯水池の水質変化機構を捉えることが必要である。

謝 辞

本論文は、著者が大学院に入学した昭和42年度に、京都大学工学部衛生工学科第5講座として新設された水質工学研究室において、合田健前教授（現、国立公害研究所水質土壌環境部長）の御指導の下に、過去約8年間にわたって行なってきた研究成果をまとめたものである。著者が本研究に入る端緒を与えられ、終始御指導、御鞭達を賜わり、論文草稿に目を通して頂いた合田健先生に深く感謝いたします。また、研究成果のとりまとめにあたって御指導、御助言を賜わった井上頼輝教授に心から感謝の意を表します。揚水発電用貯水池の水質変化についての研究の機会を与えて下さり、御指導を頂いた末石富太郎前教授（現、大阪大学工学部環境工学科教授）に厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたって御助言、御助力を頂いた宗宮功助教授に感謝の意を表するとともに、何かとお世話になった水質工学研究室の皆様方に御礼申し上げます。とくに、実験や観測調査の際に献身的な御協力を頂いた当時学部学生のみ沢靖夫、日高茂両君、および大学院学生の大島高志、勝部利之両君に感謝する次第であります。

また、千苺貯水池の観測調査の便宜を計って頂き、貴重な資料の提供をして下さった神戸市水道局技術部浄水課、水質試験所の皆様方に心から感謝の意を表します。